JAEA-Review 2017-026 DOI:10.11484/jaea-review-2017-026

KEVIEW



超深地層研究所計画 年度報告書 (2016 年度)

Mizunami Underground Research Laboratory Project Annual Report for Fiscal Year 2016

石橋 正祐紀	濱 克宏	岩月 輝希	松井 裕哉
竹内 竜史 野	原壯 尾	上博則	也田 幸喜
見掛 信一郎	弥富 洋介	笹尾 英麗	詞 小出 馨

Masayuki ISHIBASHI, Katsuhiro HAMA, Teruki IWATSUKI, Hiroya MATSUI Ryuji TAKEUCHI, Tsuyoshi NOHARA, Hironori ONOE, Koki IKEDA Shinichiro MIKAKE, Yosuke IYATOMI, Eiji SASAO and Kaoru KOIDE

> バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部

Geoscientific Research Department Tono Geoscience Center Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

January 2018

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2018

JAEA-Review 2017-026

超深地層研究所計画 年度報告書(2016年度)

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部

石橋 正祐紀, 濱 克宏, 岩月 輝希, 松井 裕哉, 竹内 竜史, 野原 壯, 尾上 博則, 池田 幸喜⁺¹, 見掛 信一郎⁺¹, 弥富 洋介, 笹尾 英嗣, 小出 馨⁺²

(2017年11月16日受理)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構東濃地科学センターでは、高レベル放射性廃棄物の 地層処分技術に関する研究開発のうち、深地層の科学的研究(地層科学研究)の一環として、結 晶質岩(花崗岩)を対象とした超深地層研究所計画を進めている。本研究所計画では、2014年度 に原子力機構改革の一環として抽出された三つの必須の課題(地下坑道における工学的対策技術 の開発、物質移動モデル化技術の開発、坑道埋め戻し技術の開発)の調査研究を進めている。

本報告書は、2016年度に実施した超深地層研究所計画のそれぞれの研究分野における調査研究、 共同研究,施設建設などの主な研究成果を示したものである。

東濃地科学センター:〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64 +1 東濃地科学センター 施設建設課 +2 東濃地科学センター

JAEA-Review 2017-026

Mizunami Underground Research Laboratory Project Annual Report for Fiscal Year 2016

Masayuki ISHIBASHI, Katsuhiro HAMA, Teruki IWATSUKI, Hiroya MATSUI, Ryuji TAKEUCHI, Tsuyoshi NOHARA, Hironori ONOE, Koki IKEDA⁺¹, Shinichiro MIKAKE⁺¹, Yosuke IYATOMI, Eiji SASAO and Kaoru KOIDE⁺²

Geoscientific Research Department, Tono Geoscience Center Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management Japan Atomic Energy Agency Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received November 16, 2017)

The Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) project is being pursued by the Japan Atomic Energy Agency (JAEA) to enhance the reliability of geological disposal technologies through investigations of the deep geological environment in the crystalline rock (granite) at Mizunami, Gifu Prefecture, central Japan.

On the occasion of the research program and management system revision of the entire JAEA organization in 2014, JAEA identified three important issues on the geoscientific research program: "Development of countermeasure technologies for reducing groundwater inflow", "Development of modeling technologies for mass transport" and "Development of drift backfilling technologies", based on the latest results of the synthesizing research and development (R&D). The R&D on three important issues have been carrying out on the MIU project.

In this report, the current status of R&D activities and construction in fiscal year 2016 is summarized.

Keywords:

Mizunami Underground Research Laboratory, MIU Project, Geological Disposal of HLW, Crystalline Rock, Annual Report

⁺¹ Geoscience Facility Construction Section, Tono Geoscience Center

⁺² Tono Geoscience Center

目 次

1.	はじめに	1
2.	超深地層研究所計画の概要	3
	2.1 目標	3
	2.2 調査研究の進め方	6
	2.3 成果の反映	8
	2.4 瑞浪超深地層研究所用地周辺の地質	.10
	2.5 瑞浪超深地層研究所の施設概要	.11
3.	調査研究および施設建設	.12
	3.1 地下坑道における工学的対策技術の開発	.13
	3.1.1 大規模湧水に対するウォータータイトグラウト技術の開発	.13
	3.1.2 地下水管理技術の開発	.20
	3.2 物質移動モデル化技術の開発	.24
	3.2.1 低透水性領域での亀裂ネットワークモデル化手法の開発	.24
	3.2.2 地質環境の長期変遷解析技術の開発	.28
	3.2.3 深部塩水系地下水の起源・滞留時間の理解	.33
	3.3 坑道埋め戻し技術の開発	.34
	3.3.1 坑道閉鎖に伴う環境回復評価技術の開発	.34
	3.3.2 長期モニタリング技術の開発など	.41
	3.4 正馬様用地における調査研究	.48
	3.5 施設建設	.50
4.	共同研究・施設利用	.55
5.	おわりに	.59
参	考文献	.60
付	禄 広域地下水流動研究 2016 年度報告	.64

Contents

1. Introduction	L
2. Overview of the Mizunami Underground Research Laboratory Project	}
2.1 Goals of the MIU Project	3
2.2 Approach of the MIU Project	;
2.3 Application of research and development results	3
2.4 Geology)
2.5 MIU facilities	L
3. Results of investigations and construction	2
3.1 Development of countermeasure technologies for reducing groundwater inflow13	}
3.1.1 Water-tight grouting technology	}
3.1.2 Effluent treatment technology)
3.2 Development of modeling technologies for mass transport	ł
3.2.1 In-situ test and modeling fracture network24	ł
3.2.2 Evaluating long-term change of geological environment	3
3.2.3 Inference of origin and residence time of deep saline water	}
3.3 Development of drift backfilling technologies	ł
3.3.1 Evaluation of recovery process and geological environment post closure	ł
3.3.2 Long-term monitoring of geological environment	L
3.4 Investigation at the Shobasama Site	3
3.5 Construction at the MIU Construction Site)
4. Collaboration studies with research organizations	5
5. Conclusions)
References)
Appendix Results of the Regional Hydrogeological Study Project in FY201664	ŀ

1. はじめに

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(以下,原子力機構)東濃地科学センターは,原子 力政策大綱¹に定められている「深地層の研究施設等を活用して,深地層の科学的研究,地層処 分技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化等に向けた基盤的な研究開発,安全規制のための研 究開発を引き続き着実に進めるべきである」との方針に基づき,高レベル放射性廃棄物の地層処 分技術に関する研究開発のうち深地層の科学的研究(地層科学研究)を進めている。このうち, 超深地層研究所計画は,結晶質岩(花崗岩)を主な対象として岐阜県瑞浪市において進めている 研究計画である。

東濃地科学センターでは、1994年6月に公表された「原子力の研究,開発および利用に関する 長期計画(以下,原子力長計)」²において定められた「地層処分研究開発の基盤となる深部地質 環境の科学的研究を着実に進めること」との方針および深地層の研究施設の位置づけに基づき 1996年11月に「超深地層研究所地層科学研究基本計画(以下,基本計画)」³⁾を策定し,超深地層 研究所計画における調査研究を進めてきた。その後、2000年11月に策定された原子力長計⁴⁾にお いて核燃料サイクル開発機構(現:原子力機構)に新たな役割が与えられたことに伴い、2001年4 月に基本計画を改訂した⁵⁾。さらに、2002年1月に瑞浪市との間で同市明世町の市有地の賃貸借契 約を締結し、超深地層研究所の研究坑道*などを同市有地に設置することとしたのを機に基本計画 を改訂した⁶⁾。改訂した基本計画を踏まえ、また、2005年7月に設置された国の地層処分基盤研究 開発調整会議における議論の結果(資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構,2006)⁷⁾(以 下,全体計画)や原子力政策大綱における原子力機構の役割に基づいて研究開発を進めてきた。

その後,2008年3月に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」(以下,「基本方針」) および「特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画」(以下,「最終処分計画」)の改定に関する閣 議決定がなされ(同年4月施行),「基本方針」においては研究開発機関の役割として,深地層の 研究施設や研究開発の内容の公開を通じた国民との相互理解促進への貢献について明示され,「最 終処分計画」においては,地層処分事業の実施主体による精密調査地区の選定時期が「平成20年 代前半」から「平成20年代中頃」に変更された。一方,2008年度までの超深地層研究所計画での 調査研究により得られた情報から,深度300m付近は,より深部の地質環境と比較して割れ目が 多く,湧水が多いことが予想された。以上のような「基本方針」と「最終処分計画」の改定およ びこれまでの調査研究で得られた成果を踏まえ,深度300mに新たに研究坑道を設置して調査研 究することにより,より深部での調査研究の成果とあわせて技術の高度化が可能になること,研 究の場を広く一般に公開することで地層処分に関する国民との相互理解に資することが期待でき ることなどから,2008年度に調査研究用の水平坑道を整備することとした。以上のような「基本 方針」と「最終処分計画」の改定および深度300mへの調査研究用の水平坑道の整備を背景に, 原子力機構では2010年に基本計画を改訂した⁸。

原子力機構は、2013年に文部科学省日本原子力研究開発機構改革本部が決定した「日本原子力 研究開発機構の改革の基本的方向」⁹⁰を受けて、改革計画¹⁰⁰を策定した。同改革計画の中に示さ れた事業の見直しの一環として、瑞浪と幌延の二つの深地層の研究施設計画については、2015年3 月までに予定していた研究開発成果の取りまとめを前倒しして行い、東京電力ホールディングス (株)福島第一原子力発電所事故後の地層処分事業の動向も視野に入れ、2014年9月末に深地層の 研究施設で行うべき必須の課題を提示し¹¹⁾、この必須の課題に基づき、基本計画を改訂した¹²⁾。

本報告書は、2016年度の年度計画13)に基づき実施した、超深地層研究所計画の第3段階「研究

^{*} 調査研究のために掘削される主立坑,換気立坑,水平坑道などからなる超深地層研究所の地下部分

坑道を利用した研究段階」における調査研究の成果を示したものである。

また、東濃地科学センターでは、地質環境特性の研究を担うプロジェクトの一つとして、超深 地層研究所計画に先立ち広域地下水流動研究を進めてきた¹⁴⁾。この研究は、広域における地表か ら地下深部までの地質・地質構造、岩盤の水理や地下水の水質を明らかにするために必要な調査・ 解析技術の開発を目標とするものであり、地下水流動系の涵養域から流出域までを包含する約 10km四方の領域を対象に1992年度に調査研究を開始し、2004年度末をもって主要な現場調査を 終了した。2005年度からは、土岐花崗岩における水理学的・地球化学的な基礎情報の取得および 地下水流動解析結果の妥当性確認のためのデータ取得を目的として、既存の観測設備による表層 水理観測(河川流量、降水量)およびボーリング孔を用いた地下水長期モニタリングを継続して きた。このうち表層水理観測は、所期の目的を達成したことにより、2014年度で終了した。超深 地層研究所計画では、広域地下水流動研究で取得されたこれらの観測データを、研究坑道の建設 に伴う研究所用地周辺の岩盤や地下水の変化を把握するために利用している。本報告書の巻末に、 広域地下水流動研究についての2016年度の調査研究の成果を示す。

2. 超深地層研究所計画の概要

超深地層研究所計画における調査研究は、研究坑道の建設に先立って開始し、研究坑道の完成 後までの約20年をかけて実施する。本計画では、研究坑道の建設工程やこれに伴う調査研究の課 題、対象、空間スケールなどを考慮し、計画全体を、第1段階(地表からの調査予測研究段階)、 第2段階(研究坑道の掘削を伴う研究段階)および第3段階(研究坑道を利用した研究段階)の3 段階に区分して進めている。このように段階的に進めることにより、天然の地質環境と、その地 質環境が坑道の掘削などにより変化する状況を把握することができる。また、この間、深部地質 環境の予測とその予測の妥当性の確認を段階ごとに繰り返して行うことにより、前段階で適用し た調査・解析・評価手法の妥当性や有効性を評価することが可能となる。これらにより得られた 情報や知見などは、地質環境を対象とした一連の調査、評価などに関する総合的な方法論として の体系化を通じて、処分事業と安全規制の技術基盤の整備に資するとともに、地層処分に関する 国民との相互理解促進にも貢献することが期待される。

本計画では、当初は岐阜県瑞浪市の原子力機構用地(図2-1:正馬様用地)において「地表からの調査予測研究段階(第1段階)」を進めてきた。その後、2002年1月に瑞浪市と市有地の賃貸借 契約を締結し、超深地層研究所の研究坑道などの施設を市有地(図2-1:瑞浪超深地層研究所用地; 以下、研究所用地)に設置し、調査研究を進めることとした。

本計画の第1段階の調査研究は、1996年度から2004年度まで実施した。第2段階の調査研究は、 2004年度に開始し、2013年度末で一旦終了した。第3段階の調査研究は、2010年度から実施している。



図2-1 超深地層研究所の設置場所

2.1 目標

超深地層研究所計画においては、全体目標として以下の二つを設定している(詳細は、基本計画¹²⁾を参照)。

【全体目標】

- ・深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備
- ・深地層における工学技術の基盤の整備

【段階目標】

第1段階:地表からの調査予測研究段階

地表からの調査研究による地質環境モデルの構築および研究坑道掘削前の深部地質環境の 状態の把握

地表からの調査研究などにより深部地質環境に関する情報を取得し、以後の調査研究の初期条件として研究坑道掘削前の未擾乱の地質環境特性を詳細に把握する。また、取得した情報の集約 と解釈をとおして、サイトスケール(数 km 四方)(図 2.1-1、表 2.1-1)の地質環境モデル(地 質構造モデル、水理地質構造モデル、地球化学モデルおよび岩盤力学モデル)を構築する。さら に、新たに取得する情報に基づき、適宜、地質環境モデルを更新し、調査の種類・量、解析・評 価の手法および結果の精度との関係を把握する。これにより、一連の調査・解析・評価手法の有 効性を評価する。

また,これらの地質環境(たとえば,地下水流動場,地下水の地球化学特性,岩盤の力学特性 など)の研究坑道掘削に伴う変化を推定する。

② 研究坑道の詳細設計および施工計画の策定

後述の③において策定する研究坑道の掘削を伴う研究段階および研究坑道を利用した研究段階 における概略的な調査研究計画に基づいて,研究坑道の詳細レイアウトを決定する。この際,本 段階において取得する深部地質環境に関する情報,および研究坑道掘削に伴う深部地質環境の変 化に関する推定結果などを考慮する。また,実際の地質環境が推定結果と大きく異なる場合や, 突発的な事象(大量出水や山はねなど)が発生した場合などにおいては,設計変更や対策工の適 用により柔軟に対応することが重要である。さらに適用する施工技術ならびに機械・設備を選択 し,具体的な施工計画を決定する。

研究坑道の掘削を伴う研究段階の調査研究計画の策定

研究坑道の掘削を伴う研究段階における具体的な調査研究計画,および研究坑道を利用した研 究段階における概略的な調査研究計画を策定する。この際,前述の深部地質環境に関する情報, ならびに研究坑道掘削に伴う深部地質環境の変化に関する推定結果などを踏まえ,全体計画など に示された今後の研究開発の課題を考慮することが重要である。

第2段階:研究坑道の掘削を伴う研究段階

研究坑道の掘削を伴う調査研究による地質環境モデルの構築および研究坑道の掘削による 深部地質環境の変化の把握

研究坑道の掘削および坑道内からのボーリング掘削により取得される情報などに基づき,前段 階において構築した地質環境モデル(サイトスケール)の妥当性を確認するとともに,その結果 を踏まえ,地質環境モデル(サイトスケール)を更新する。また,更新した地質環境モデル(サ イトスケール)(図 2.1-1,表 2.1-1)を基に,取得した情報を用いて,ブロックスケール(数十 ~数百 m 四方)の地質環境モデルを構築する。さらに,新たに取得する情報に基づき,適宜,地 質環境モデル(ブロックスケール)を更新し,調査の種類・量,解析・評価の手法および結果の 精度との関係を把握する。

また,研究坑道の掘削に伴う地質環境の変化のモニタリングにより取得する情報および前述し た地質環境モデル(サイトスケール)を用いた解析結果などに基づき,研究坑道掘削が周辺の地 質環境に与える影響などを評価する。

以上の調査研究を実施することにより、研究坑道掘削時の段階的な地質環境の調査・解析、お

よび,その評価結果を基に,地表からの調査予測研究段階において実施した一連の調査・解析・ 評価手法の妥当性を確認するとともに,研究坑道の掘削を伴う研究段階において地質環境を段階 的に調査・評価するための体系的な方法論を整備する。

② 研究坑道の施工・維持管理に係わる工学技術の有効性の確認

研究坑道の施工・維持管理において適用した工学技術の有効性を確認するとともに、それらの 高度化を図る。また、実際の地質環境が推定結果と大きく異なる場合や、突発的な事象が発生し た場合などにおいては、設計および施工計画の変更に対処できることを示す。また、掘削中の研 究坑道内の安全を確保するための技術を整備する。

以上を通して,大深度での地下施設の設計・施工計画構築技術の妥当性や,建設技術,施工対 策技術および安全確保技術の適用性を段階的に評価し,結晶質岩/淡水系地下水環境における体 系化した深地層の工学技術の基礎を提示する。

研究坑道を利用した研究段階の調査研究計画の策定

研究坑道を利用した研究の課題を見直すとともに,研究坑道を利用した研究段階における調査 研究計画の具体化を図る。この際,前述の深部地質環境に関する情報,これまでに東濃鉱山や釜 石鉱山ならびに海外の地下研究施設などにおいて実施してきた調査研究の成果や課題などに加え, 全体計画などに示された今後の研究開発の課題を考慮することが重要である。

第3段階:研究坑道を利用した研究段階

研究坑道を利用した調査研究による地質環境モデルの構築および研究坑道の掘削から維持 管理・閉鎖に伴う深部地質環境の変化の把握

研究坑道を利用した調査研究により深部地質環境の特性を把握するための手法の開発を行うと 同時に、深部地質環境に関する情報を三次元的に取得・蓄積し、本段階までに構築した地質環境 モデル(サイトスケールならびにブロックスケール)の妥当性を確認する。その結果に基づき、 適宜、地質環境モデル(サイトスケールならびにブロックスケール)を更新する。また、本段階 までの地質環境モデルの構築および更新を通して、不確実性を明らかとするとともに重要な要素 の特定を行う。これらに基づいて、調査の種類・量、解析・評価の手法と結果の精度との関係を 明らかにする。

また,研究坑道の部分的な掘削・維持管理・閉鎖時の地質環境モニタリングなどにより取得す る情報および前述の地質環境モデルを用いた解析結果などに基づき,研究坑道の掘削から維持管 理・閉鎖に伴う研究坑道周辺の地質環境特性の一連の変化を把握する。さらに,地震や隆起・侵 食といった長期的な自然現象が地質環境に与える影響も念頭に置いて,研究坑道周辺の地質環境 特性の長期的な変遷を統合的に解析する手法の検討を行う。

② 深地層における工学技術の有効性の確認

地下深部における,研究坑道を長期にわたり維持・補修する技術の適用性を確認する。また, 工程や品質などの管理体系を構築し,研究坑道内の研究環境を適切に維持管理し安全を確保する ための技術を整備する。また,坑道掘削が地質環境に及ぼした影響を修復・軽減する工学技術な どを開発・整備する。さらに,実際の地質環境が推定結果と大きく異なる場合や,突発的な事象 が発生した場合などにおいては,必要に応じ,設計および施工計画の変更に対処できることを示 す。



図 2.1-1 空間スケールの概念

	空間スケール/対象範囲	地層処分技術に関する研究開発における位置付け
リージョナル スケール	平面:数百[km²]程度 (数十[km]×数十[km]) 深さ:10[km]程度	・ローカルスケールの研究領域/境界条件の設定
ローカル スケール	平面:数十[km²]程度 (数[km]×数[km]) 深さ:数[km]程度	・地層処分システム全体の安全評価 ・地下施設の設計のための基礎情報の収集 ・サイトスケールの研究領域/境界条件の設定
サイト スケール	平面:数[km ²]程度 (数百[m]~数[km]×数百[m]~数[km]) 深さ:2~3[km]程度	 ・人エバリア周辺から対象岩盤全体の安全評価 ・地下施設建設時の力学・水理状態の予測 ・ブロックスケールの研究領域/境界条件の設定
ブロック スケール	平面:数百[m²]程度 (数十〜数百[m]×数十〜数百[m]) 深さ:数百[m]〜1[km]程度	 ・人エバリアから生物圏までの一部における安全 評価 ・地下施設建設時の力学・水理状態の予測 ・より小スケールの研究領域/境界条件の設定

表 2.1-1 空間スケールの対象範囲と位置付け

2.2 調査研究の進め方

本計画の第1段階および第2段階の調査研究においては、地層処分における「安全評価」、「地下施設の設計・施工」および「環境影響評価」の観点から設定した個別目標と課題に対して調査研究項目を設定することを基本的な進め方としてきた^{15,16,17)}。

第3段階も同様の考え方 17)で進めていくことを基本とする。第3段階の調査研究で対象とする 個別目標を図 2.2-1 に示す。なお,図 2.2-1 は今後の研究の進捗状況などを踏まえて,適宜最適 化していくこととする。

				수 H 후 박 산			MILIË	画十					
全日本		個別目標	課題	<u>治</u> 减地 1.小 流動研究	第1	段階	第2段	調	第3段階	和 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	寛移動モデル化技術の開発	坑道埋め戻し技術の開発	地下坑道における工学的対策 は米の関発
ц ¥				_	S	в	S	в	s	в			
			移行経路として重要な構造の把握	0	0	I	0	Ø	0	0	0	0	I
		地質構造の三次元的分布	対象岩盤の分布と形状の把握	0	0	I	0	T	1		1	I	I
		の把握	岩盤の地質学的不均質性の把握	0	0	0	0	0	0	0	0	0	I
			地質/地質構造の長期変化の推定	0	0	I	0	I.	©	1	0	I	I
			- 地下水流動場の把握	0	0	I	0	I.	1	1	I	I	I
		地下水の流動特性の把握	地下水流東分布の把握	0	Ø	0	O	0	0	0	0	0	1
			地下水流動特性の長期変化の推定	0	0	I	0	T	0	1	0	I	1
			地下水の塩分濃度分布の把握	0	0	T	Ø	T	0	1	I	0	I
ļ	則	若下火のも球化学特性の 首歳	- 地下水のpH・Eh環境の把握	0	0	T	Ø	T	0	1	1	0	I
勒 첖	帮全		地下水の水質変化の推定	0	0	T	0	T	0	1	0	0	I
Ø 覇	淁		物質移動場の把握	I	I	0	I.	0		0	0	0	1
雸(物質移動の遅延効果の 神振	岩盤の収着・拡散特性の把握	I	T	0	I.	0		0	0	0	I
0祔支		HI DI	コロイド/有機物/微生物の影響の把握	I	T	T	T	Ø		0	0	0	I
¥⊞);			- EDZの範囲の把握	I	T	0	T	0		0	0	0	0
₩・		EDZの地質環境特性の	- EDZの透水性、物理・力学特性分布の把握	I	T	0	T	0		0	0	0	0
¥鸨		把握	- EDZの地球化学特性の把握	I	T	I	T	T		0	0	0	0
·查讀			EDZの応力状態の把握	I	I.	0	I.	0		0	I	0	0
ſ∎ØĨ		마파 오 마 마까 X	- 帯水層の分布の把握	Ø	0	T	T	T	1	1	I	I	I
έ υ		布林刻未の尤権	帯水層中などにおける流速分布の把握	0	0	I	I	I.	1	1	I	I	I
賀地			- 応力場の把握	Ø	0	I	0	O		0	1	0	1
暗緊	工就	地下空洞の力学安定性の 世撮	- 岩盤の物理・力学特性の把握	0	Ø	I	O	Ø		0	I	0	1
g	•+ <u></u>	1011	下連続構造などの有無の把握	I	T	I	I	0		0	I	0	1
	躍の	地下沿道への地下大流入	▶ 地下空洞への地下水流入量の把握	I	T	I	0	T	0	0	I	0	0
	領武	状態の把握	地下空洞への流入地下水水質の把握	I	I.	I	0	I.	0	0	I	0	0
	(지함	다 타 아 한 타 타 아 아 나 남	- 地温勾配分布の把握	0	Ø	I	I	I	1		I	I	I
	F	地下の通送球児の打描	- 岩盤の熱特性の把握	0	0	I	I	Ø	1		1	I	I
	₽₽		■ 地下水位・水圧分布への影響の把握	0	0	T	0	T	©		1	0	I
	唱聲	地下施設建設が周辺環境	地下水の水質への影響の把握	0	0	I	0	T	©	1	1	0	I
	澋歕	く与える影響の把握	- 排水放流先河川の水質の把握	0	0	I	0	T	©	1	1	I	0
	罰		振動・騒音の把握	0	0	T	0	T	©	1	I	I	I
ω S	•4		 一設計・施工計画技術の開発 	I	I.	0	I.	0	0		1	0	I
く いら いける	膏 妥 冒(建設技術の開発	I	I	I	I	o	i T		I	I	I
は し で か が の が の が の が の が の が の が の が の が 型 空 格	の (3) (五) (1)	■ 大深度地質環境下における 工学技術の有効性の確認	 施工対策技術の開発 	T	T	0	I	Ø	0	0	1	0	0
机机 支持	戭イ		- 安全性を確保する技術の開発	I	I	I	I.	O) 	0	I	I	I
≣T K	.解		掘削影響の修復・軽減技術の開発	I	I.	I	T	I.		0	,	0	0
			(EDZ: 掘削影響領域)										
			L:ローカルスケール, S:サイトスケール, B:ブロ	コックスケール						ö	個別目標/課題と関係あり		
			◎:主な研究対象の段階/スケール、〇:補助6	的な研究対象	の段階、	144-1	د			ï	関係なし		
			(注)第 3 段階で対象とする課題は, 三枝	[まか(2011) ¹	ったー部	3修正							

図 2.2-1 個別目標および課題

JAEA-Review 2017-026

2.3 成果の反映

超深地層研究所計画における地層科学研究の成果は,原子力発電環境整備機構が進める処分事 業や国が行う安全規制に対し技術基盤として反映されるほか,地下深部についての学術的な研究, ならびに地層処分に対する国民との相互理解の促進に寄与するものである。これまでの調査研究 により,深度 500m 程度以深の地質環境は割れ目の少ない還元環境にあることが明らかとなって きた。また,深度 300m 付近については,高透水性の岩盤であることが明らかとなっている。こ のように異なった地質環境を対象とした研究開発の成果は,繰り返しアプローチ¹⁵⁾(図 2.3-1) による地質環境特性調査技術の構築のみならず,全体計画などに示された,処分事業の実施や安 全規制の技術基盤として重要であるとともに,国民の地層処分に関する技術的信頼感の醸成に貢 献できるものとなる。

以下に, 2.1 に示した二つの全体目標に対して得られる成果について, その具体的な反映先を 示す。

① 深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備

各段階において、「概念の提示→計画の立案→調査の実施→データの解釈→モデル化・解析→解 析結果の評価→不確実性の評価→重要な要素の特定」というプロセスを繰り返して調査研究を進 め、段階的に地質環境に関する知見の不確実性を低減することにより、結晶質岩の地質環境を合 理的に調査・評価するための体系的な方法論を提示する。この成果は、全体計画に示された段階 目標である、地表からの調査に関わる技術基盤の確立(地表からの調査技術の検証〜地下施設で の調査の考え方)および地下施設を活用した調査に係る技術基盤の確立に役立てられるとともに、 原子力政策大綱に示されたとおり地層処分技術の信頼性向上や安全規制のための研究開発にも活 用される。また、一連の調査で取得される深部地質環境に関する情報や知見などは、国内外の地 球科学分野の学術的研究の成果などと合わせて、地下深部における様々な現象(たとえば、地下 水による物質の移動や地震の影響など)の理解、わが国の深部地質環境を示すモデルの信頼性の 向上および地下空間利用の際に用いられる工学材料の検討などにも反映できる。

② 深地層における工学技術の基盤の整備

超深地層研究所計画における工学技術の成果としては、研究坑道の設計、施工計画の策定、掘 削、施工対策、維持管理、閉鎖および安全確保に係る、既存のあるいは新たに開発される工学技 術の有効性の確認が期待される。また、実際の地質環境が推定結果と大きく異なる場合や、突発 的な事象が発生した場合などにおいては、設計および施工計画の変更に対処できることを示す。

これらの工学技術は、地層処分場の設計、建設ならびに操業や閉鎖にかかわる合理的かつ最適 な技術の開発の基盤として活用される一方、将来における地下空間利用の基礎として、地下深部 に地下空間を設け安全に研究活動などが実施可能であることなどを実証するために役立てられる。 JAEA-Review 2017-026



図 2.3-1 調査研究の繰り返しアプローチ

2.4 瑞浪超深地層研究所用地周辺の地質

研究所用地および正馬様用地においては,基盤をなす後期白亜紀の花崗岩(土岐花崗岩)を新 第三紀中新世の堆積岩(瑞浪層群)が不整合に覆い,さらにそれらを固結度の低い新第三紀中新 世〜第四紀更新世の砂礫層(瀬戸層群)が不整合に覆っている(図2.4-1)^{18,19)}。また,土岐花崗



図2.4-1 瑞浪超深地層研究所用地周辺の地質

岩中には、石英斑岩の岩脈が分布する。研究所用地の北方、西方および東方には美濃帯堆積岩類 が、北東方には濃飛流紋岩が分布する¹⁸⁾。

瑞浪層群は,美濃帯堆積岩類,土岐花崗岩および濃飛流紋岩を基盤として,新第三紀中新世~ 第四紀更新世の瀬戸層群に不整合で覆われる。岩相によって下位から土岐夾炭累層,本郷累層, 明世累層,生俵累層に区分される²⁰⁾。また,明世累層と生俵累層の間に宿洞累層が分布する場所 もある²¹⁾。

瀬戸層群は,美濃帯堆積岩類,濃飛流紋岩,土岐花崗岩および瑞浪層群を不整合に覆い,層相 によって下位から土岐口陶土層と土岐砂礫層に区分される²²⁾。

2.5 瑞浪超深地層研究所の施設概要

瑞浪超深地層研究所(以下,研究所)の施設は,地上施設と研究坑道からなる(図2.5-1)。地 上施設は,櫓設備,巻上設備,給排水設備,換気設備,コンクリートプラント,排水処理設備, 受変電設備,非常用発電設備,資材置場,火工所,管理棟などからなる。研究坑道は,主立坑, 換気立坑,深度100mごとに主立坑と換気立坑をつなぐ予備ステージ,深度300mステージ,深度 500mステージからなる。



図2.5-1 瑞浪超深地層研究所の施設の現状

3. 調査研究および施設建設

本章では、2016年度に実施した研究所用地における第3段階の調査研究の成果および施設建設 について取りまとめた。研究坑道のレイアウトおよび研究坑道における主な調査位置を図3-1に示 す。



図3-1 研究坑道のレイアウトおよび主な調査位置

3.1 地下坑道における工学的対策技術の開発

研究坑道への湧水量をプレグラウチングとポストグラウチングの組合せによって制御可能とす るウォータータイトグラウト技術を実証する。また,地下水排水処理技術などの地下水管理技術 の高度化に取り組む。

3.1.1 大規模湧水に対するウォータータイトグラウト技術の開発

(1) 目的

日本の地質環境の特徴の一つとして、断層や割れ目が多いことが挙げられる。このような地質 環境において地下に坑道を掘削した場合、坑道への湧水が多いと想定されるため、地下施設の作 業環境の維持、排水処理の効率化、施設埋め戻しの際の埋め戻し材中の粘土分の流出などを考慮 し、坑道への地下水の湧水を効果的に抑制する技術を確立することが重要な課題の一つである。 そのため、プレグラウチングとポストグラウチングを併用することにより、グラウチングによる 改良範囲の拡大あるいは岩盤の透水係数のさらなる低減により湧水量を抑制するウォータータイ トグラウト技術を整備する。本研究課題については、主に深度500mステージの研究坑道を利用 してポストグラウチングを実施し、坑道湧水量の変化を測定することで湧水抑制効果を評価する とともに、岩盤の透水係数に応じたグラウト材料(超微粒子セメントや溶液型材料)の選定や注 入方法、効果的な注入れの配置などの手法を整備する。また、グラウチングによる湧水量の低減 効果、グラウト注入による岩盤強度の増加を考慮した坑道安定性の評価方法を整備する。さらに、 これまで研究坑道の掘削工事や対策工事に使用されたセメントや鋼材などの人工材料の経年変化 を調査するとともに、グラウト材料や覆工および吹付けコンクリートの岩盤への影響を調査し、 これらの人工材料による岩盤の長期的な劣化や地下水への化学的な影響を評価する方法を整備する。

(2) 実施内容と結果

深度500m研究アクセス南坑道では、プレグラウチングを実施したうえで坑道を掘削した。プ レグラウチング実施区間のうち、比較的湧水が多い区間(約16m)を対象に、2014年度にさらな る湧水抑制を目指したポストグラウチング(材料:超微粒子セメント、溶液型材料、注入方法: 複合動的注入)を実施し、その湧水抑制効果について評価を行った²³⁾。ポストグラウチングは、 プレグラウチング範囲の外側を対象としてグラウト注入を行うことでさらに湧水量を抑制でき、 注入材料として溶液型材料(活性シリカコロイド)、注入方法として周波数の異なる脈動を組合わ せた複合波(複合動的注入)が効果的であることを確認した。

2016年度は、2014年に実施したポストグラウチング区間で、比較的湧水箇所が多い範囲を含む 区間(坑道延長約4m)を対象に、坑道の湧水箇所に対する湧水抑制を目的としたポストグラウチ ングを実施した(図3.1.1-1)。上記のポストグラウチングと同様に、注入材料として溶液型材料 を使用し、注入方法として複合動的注入工法を適用した。

ポストグラウチングの前後で、坑道の湧水箇所に対して1箇所当りの湧水量を測定した結果、 それぞれの湧水箇所の湧水量を低減することができ、5箇所あった1L/min以上の湧水箇所すべて を1L/min未満に低減することができた(図3.1.1-2,表3.1.1-1)。この結果から、ポストグラウチ ングは湧水箇所に対する湧水抑制効果が期待できる技術であることを確認できた。 JAEA-Review 2017-026



図3.1.1-1 坑道の湧水箇所に対する湧水抑制対策技術としてのポストグラウチング実施範囲



図3.1.1-2 ポストグラウチング実施区間と湧水箇所の分布

湧水筒所	湧水量(L/min)		
(換気立坑壁面からの 坑道延長位置)	ポストグラウチング 実施前	ポストグラウチング 実施後	
① 94.7m	2.10	0.30	
② 94.8m	2.50	0.60	
③ 93.2m	1.30	0.00	
④ 93.3m	0.30	0.20	
⑤ 97.7m	1.10	0.10	
⑥ 97.1m	0.10	0.10	
⑦ 89.0m	0.50	0.50	
⑧ 94.7m	0.45	0.13	
9 94.7m	0.80	0.40	
10 94.7m	0.10	0.00	
11) 94.7m	0.30	0.00	
12 94.7m	0.10	0.10	
13 94.7m	0.20	0.10	
(14) 94.2m	0.05	0.10	
15 93.7m	0.01	0.00	
16 92.7m	0.15	0.20	
① 92.8m	0.18	0.10	
18 97.0m	0.45	0.50	
(19) 97.7m	1.00	0.05	
20 97.7m	0.40	0.10	

表3.1.1-1 ポストグラウチング実施前後の湧水箇所1箇所当りの湧水量

また、国からの受託研究の一環として、グラウト材料の経年変化を確認するため、グラウチン グ後3年経過した試料、および6年経過した試料を深度300m研究アクセス坑道の東側側面(主立 坑中心から坑道延長で約40m地点;高さは約1m)より割れ目がグラウト材料で充填された岩石コ ア(約1m)を採取し、観察・分析を実施した。グラウチング時の初期のグラウト材料の状況を把 握するため、坑道掘削時のプレグラウチングと同じ材料を用いてセメント硬化体を作製し、観察 等を行った。加えて、既往の研究成果も勘案しつつ、グラウト材料やそれが及ぼす周辺地質環境 の変化について考察した。これらの調査の結果、以下のような知見が得られた²⁴⁾。

施工後約3年経過したグラウト材料は、結晶化領域と含非晶質領域に分けられる(図3.1.1-3)。 含非晶質領域には、C-S-Hゲルまたはポルトランダイトの可能性があるものに加えて方解石も認 められる。セメント供試体の薄片観察結果から、高い水/セメント比(Water/Cement:W/C)のセ メントミルクで作製したセメント硬化体では、硬化段階で方解石が形成されていた(図3.1.1-4)。 このような、高W/Cのセメント硬化体はセメントに対する水が多く(炭酸が多く)、硬化時点で炭 酸化が進み方解石が形成されることは既に指摘されている²⁵⁾。このことから、含非晶質領域中の 方解石は、グラウト材料が硬化した段階から形成されていたと考えられる(図3.1.1-5 a))。結晶 化領域は、地下水の通水部と考えられる周辺岩盤との境界周辺やグラウト材料中の微小割れ目周 辺に発達している。本坑道周辺の地下水中にはHCO3⁻⁻が含まれており、このような条件ではポル トランダイトやC-S-Hの溶解によってCaが供給された際に方解石が形成されることが指摘され ている²⁶⁾。グラウチング領域にはHCO3⁻⁻を含有する地下水が常に供給される状況にあることから、 その結果として方解石の形成が促進され結晶化領域が形成されたと考えられる(図3.1.1-5 b))。



図 3.1.1-3 施工後約 3 年(a) および 6 年(b) 経過した試料の 岩石薄片観察結果(クロスニコル)



図 3.1.1-4 セメント供試体の薄片観察結果(クロスニコル) 高い干渉色を示す箇所(例えば Cal で示す箇所)は方解石である。 W/C:水/セメント比



施工後約3年および6年経過したグラウト材料周辺岩盤に着目して観察を行った結果,グラウト 材料周辺岩盤には、グラウト材料の影響と考えられるような新たな鉱物の形成や鉱物の溶脱など の変化は認められなかった。また、既存研究において深度200m予備ステージで取得された施工 後約4年程度経過した試料でもグラウト材料による周辺岩盤への影響は認められないことが報告 されている²⁷⁾。グラウト材料の影響と考えられる周辺地下水のpHは最大でも9.8程度である (図3.1.1-6)。この地下水は、動水勾配により坑道に向かって流れている。坑道を開放している 段階では、坑道内は大気圧であり動水勾配が大きいため、pHが上昇した地下水と岩盤が接する時 間が短く、グラウト材料による周辺岩盤への化学的影響が生じ難い状況にあると考えられる。

地下水中のpHについては、施工直後から天然の地下水よりも高い値を示し、徐々に低下して施 工後2~3年経過すると天然の地下水と同程度の値を示す(図3.1.1-6)。地下水中のCa濃度につい ては、3年程度経過した段階でも深度300m付近の天然の地下水のCa濃度に比較して高い値を示す (図3.1.1-6)。Caはグラウト材料の溶解により供給されたと考えられる(本来は、地下水のpHは 増加する)ことから、pH低下の要因がグラウト材料の溶化によるたのとは考え難い、pHの低下

増加する)ことから、pH低下の要因がグラウト材料の変化によるものとは考え難い。pHの低下 期間は、坑道への湧水量が増加した期間であること(図3.1.1-7)から、pHの低下は天然の地下 水の流入に伴う希釈効果によるものと考えられる。

地下水中のCa濃度の変化に着目すると、施工後約3年程度までは増加傾向であるが、施工後約4 年経過以降は、直線的な低下傾向を示す(図3.1.1-6)。グラウト材料からのCaの溶脱量低下の原 因としては、a)溶解度の高いポルトランダイトが溶脱した後に比較的溶解度の低いC-S-Hの溶脱 が開始することによりCa溶脱量が少なくなること²⁸⁾や、b)HCO³⁻を含む水とセメント系材料との 通水試験から、水・セメント接触面に方解石が形成されることで、Caの溶脱が抑制されること²⁶⁾ が指摘されている。施工後約3年経過したグラウト材料のµ-XRD分析の結果から、含非晶質領域 においてもポルトランダイトの存在が確認されていないことからa)の要因である可能性はあるも のの、µ-XRD分析結果は微小領域(100µm径の領域)の鉱物組成であり、全領域にポルトランダ イトが無いとは言い切れないことから、広い領域を対象とした鉱物組成の把握など、更に分析デ ータを拡充が必要であると考えられる。なお、施工後約3年目から認められるCa濃度の低下が継 続すると仮定した場合は、施工後約20年程度でCa濃度は天然の地下水の水質と同程度となると考 えられる。このことから、この傾向が持続すると仮定する場合、グラウチングに伴う高pH環境が 形成される可能性がある期間は20年程度と推定できる。

また、グラウト材料の変化の影響の指標として、見掛ほか²⁹に示された坑道への湧水量の推定 式を用いて、湧水量および周辺ボーリング孔の水圧の変化(図3.1.1-7)に基づきグラウチング領 域の透水性を推定した(図3.1.1-8)。坑道スケールで見たグラウチング領域の透水性は、施工後 約5年までは透水性が増加し、現在安定化する傾向がある。

以上のような施設の施工等に伴う水質や透水性の変化を把握するためには、今後もモニタリン グを継続する必要があると考えられる。



3.1.2 地下水管理技術の開発

(1) 目的

研究坑道内に湧出する地下水(湧水)については,排水処理設備により処理した上で水質汚濁防止法に基づく排水基準に適合させて河川へ放流(排水)していたが,放流先河川の水質のうち自然由来のふっ素およびほう素が環境基本法に基づく環境基準を超えていたことが2005年10月に判明した。そのため,自治体と締結した環境保全協定に基づき,排水処理設備において放流先河川の環境基準が達成できる濃度までふっ素およびほう素を除去した後に,河川に放流している。

このような排水処理も含めた地下水管理技術は,大規模地下施設の建設にとって重要な課題の 一つである。また,近年,公共工事などで自然由来の重金属などを含む湧水が発生し,その対策 が求められている。

本研究では,主に排水処理技術に着目し,最新技術の動向などを文献調査などによって把握す るとともに,必要に応じて本計画での適用可能性や予想される効果を検討する。

(2) 実施内容と結果

① 排水処理の状況

排水処理フローを図3.1.2-1に示す²⁹⁾。坑道内の湧水はポンプによって地上まで汲み上げた後, ふっ素除去のために凝集沈殿処理を行う。具体的には,硫酸アルミニウムを添加して水酸化アル ミニウムを生成させた後,無機水処理剤や高分子凝集剤等の薬剤を添加するとともに,pHを調整 する。無機水処理剤には,カルシウムやマグネシウムが豊富に含まれており,粒子の荷電中和や 難溶性塩の吸着粗大化,沈降分離効率の向上等の効果がある。この薬剤とふっ素が反応すること でふっ化化合物が生成されて沈殿し,除去される³⁰⁾。

その後,砂ろ過を経て,可搬式吸着塔に充填されたイオン交換樹脂(N-メチルグルカミンを官 能基とするスチレン系マクロポーラス型キレート樹脂)に通水し,樹脂にほう素を吸着させて除 去した後,河川に放流する。ほう素吸着後の吸着塔は再生工場に運ばれ,樹脂は洗浄して再生利 用されている。

研究坑道内の湧水(地上の排水処理設備に流入する湧水を対象)の水質は毎月測定されており, 2005年10月から2017年5月までの湧水中のふっ素濃度は6.5~10mg/L,ほう素濃度は1.0~ 1.8mg/Lである³¹⁾。放流先河川における環境基準(ふっ素:0.8mg/L以下,ほう素:1.0mg/L以下) を順守するため,地上の排水処理設備においてふっ素は約1/10まで,ほう素は約3/4まで除去する 必要がある。湧水のpHは8.0~12であるが³¹⁾,処理する過程で調整される。

現在の排水処理量は約800m³/dであり、ふっ素の沈殿分離は全量を、ほう素の吸着処理はその うち約5割について実施している。現在の排水処理設備は、2007年から処理量1,500m³/dに対応で きる設備を用いて連続稼働しているが、これまで管理目標値までの除去を継続して運転している。



② ふっ素およびほう素の排水処理技術に関する文献調査

研究所での排水処理の効率化の可能性について検討するため,ふっ素およびほう素の処理技術 の最新の知見に関する文献調査を実施した。

ふっ素については、地下水中のふっ素は花崗岩類中の黒雲母や白雲母の水酸基を置換して存在 している場合が多く、Na-HCO3型の水質でpHが弱アルカリ性を示す水が存在すると、雲母のF⁻ と弱アルカリ性水のOH⁻によるイオン交換が進み、F⁻が溶出するという報告もある³²⁾。従って、 ふっ素を含む鉱物を含んでいる岩石中の地下水では、ふっ素濃度が高くなる可能性があり、処理 技術の構築が重要となる。

処理技術としては、消石灰や塩化カルシウムを添加してフッ化カルシウムを生成させて凝集沈 殿処理する手法や、これに加えてポリ塩化アルミニウムや硫酸アルミニウム等を添加して水酸化 アルミニウムを生成させて凝集沈殿処理する方法がある。また、処理の効率化のため、汚泥循環 やフルオロアパタイトとして晶析させる等の方法によって排水基準(8mg/L以下)まで除去する とともに、汚泥量、薬剤量を削減しコストを削減する技術があるが、環境基準(0.8mg/L以下) までの除去に関する事例は認められなかった^{33,34,35)}。

一方,より低濃度まで処理する方法としては吸着処理があり,ハイドロタルサイトや水酸化セリウム,層状複水酸化物(LDH)等を吸着剤として使用する方法で,環境基準までの除去が可能な事例があった^{36),37)}。

ほう素については、水中では常に酸素と結合しており、 H_3BO_3 または $B(OH)_4^-$ のいずれかで安定となり、関係は式3.1.2-1で表される³⁸⁾。

 $H_{3}BO_{3}+H_{2}O=B(OH)_{4}^{-}+H^{+}(pKa=9.25)$ (式3.1.2-1)

従って, pH>9.25ではB(OH)4⁻が, pH<9.25ではH3BO3が優先種として存在する。

ほう素は、除去が非常に困難な物質ではあるが、主な処理技術としては凝集沈殿処理や吸着処 理がある。凝集沈殿処理では、高濃度(数百mg/L)の排水に対して適用されるが、硫酸アルミニ ウムと消石灰を添加することにより生成されるエトリンガイトにほう素を取り込んで除去する方 法であり、さらに高分子凝集剤を添加する等により処理効率を向上させて排水基準(10mg/L以下) にする事例があった^{33),39),40)}。吸着処理では、ほう素の吸着特性があるN-メチルグルカミン基や繊 維状の吸着剤を使用したものがあり、低濃度(数+mg/L)の排水に対して環境基準(1 mg/L以 下)までの除去が可能な事例があった^{39),41)}。また、吸着剤の再生利用のため、高濃度となった再 生廃液を凝集沈殿法により除去する事例もあった³³⁾。

③ 最新処理技術と研究所湧水処理方法の比較・評価

上述の文献調査の結果,環境基準まで除去できる処理技術としては,ふっ素,ほう素ともに吸 着法であることを確認した。

吸着法は、吸着剤の再生利用が可能であること、脱水ケーキ等の2次廃棄物が発生しないこと 等のメリットがある反面、排水中に溶存している対象物質以外のイオン物質が吸着を妨害するこ とが環境省による実証試験においても報告されている⁴²⁾。また、研究所のふっ素処理のような高 い除去率が求められる処理では、吸着剤の吸着容量が早期に限界に達してしまい、効率的な方法 とは言えないと考えられる。さらに、研究所のように約800m³/dといった大量の排水処理の実績 については確認できなかった。

これに対して,凝集沈殿法は,懸濁粒子の荷電を中和して凝集が起こると考えられているが⁴³, 凝集によって生成される粗大粒子(フロック)により,坑道内での調査ボーリング掘削等により 発生する浮遊物質(SS)もある程度除去できると考えられる。また,2006年度から2008年度に 実施した放射線グラフト重合法により作成した捕集材を用いた研究所の湧水処理の検討における 現場試験において,掘削工事における覆工コンクリートの打設や湧水抑制対策のためのプレグラ ウチング等の作業工程によって試験時の湧水のpHが一時的に約10まで上昇し,捕集材による除 去効率の低下が確認されていることもあり⁴⁴⁾,吸着法ではこのような水質変動に対応することは 困難と考えられる。さらに,ふっ素除去に凝集沈殿処理を適用している現行の処理方法は,吸着 法によるほう素除去のためのSSの除去およびpHの調整といった前処理の役割も兼ねていると言 える。

以上より,最新の排水処理技術を調査したが,ふっ素のように高い除去率やほう素のように低 濃度から極低濃度までの除去が求められ,しかも処理量が大量である研究所の排水処理について は,現行の処理工程の効率を上回るような処理技術は見当たらず,従って現行の処理方法が現時 点でも適切であると判断された。

研究所に限らず,一般の大規模地下施設の建設および維持管理における坑内湧水の処理につい ては,ある程度水質が均質な工業排水とは異なり,その場所の地質や地下水の由来,地下施設の 建設による周辺地下水の混合や施工等の要因によって,水質が変動することが想定される。その ため,地下水に含まれる排水基準,環境基準項目の物質の濃度やその起源,溶存形態の把握,放 流先水域の特徴(水質や流量,適用法令や条例等)を踏まえつつ,施工などによる変動も十分に 検討した上で,排水処理方法を選択することがプロジェクト全体の環境負荷やコストの低減に有 効と言える。

3.2 物質移動モデル化技術の開発

花崗岩中の割れ目での物質の移動現象を理解し,モデル化するための調査解析を実施する。また,割れ目の透水性,地下水流動,地下水水質の長期的変化および地下水流動の緩慢さを明らかにするための調査を実施する。

3.2.1 低透水性領域での亀裂ネットワークモデル化手法の開発

(1) 目的

スウェーデンなどの安定大陸の結晶質岩と比較して、高透水性の割れ目が多く、かつ割れ目充 填物や変質を伴うなど、様々な特性を有する割れ目が混在する日本の地質環境においても、地下 水流動や物質移動を適切に評価し、安全評価の信頼性を向上するため、低透水性領域での亀裂ネ ットワークモデル化手法の開発は重要な課題である。そのため、深度約500m以深に分布する下 部割れ目低密度帯を主対象としてボーリング調査を実施し、割れ目の分布や特性といった、地質 構造モデル、水理地質構造モデルの構築に必要な情報を取得する。また、坑道周辺に分布する透 水性の割れ目や健岩部の岩盤について、遅延現象など物質移動に係わる現象を把握するための室 内および原位置における物質移動試験などを実施する。さらに、花崗岩中における物質移動に係 わる現象を把握するために必要な地下水中のコロイド、有機物、微生物に関するデータを取得す る。これらの調査・解析・評価のために、必要に応じて調査・解析手法や調査機器の改良・開発 を行う。これらの調査研究により、調査から評価までの一連の低透水性領域での亀裂ネットワー クモデル化手法を整備する。

(2) 実施内容と結果

① 原位置試験

2016年度は、深度500m研究アクセス南坑道において、トレーサー試験装置の原位置での適用 性を確認するために、単孔式のトレーサー試験および2本のボーリング孔間のトレーサー試験を 実施した(図3・1:15MI52号孔、15MI53号孔)。その結果、今回使用したトレーサー試験装置お よび試験手法を適用することにより、深度500mにおいても岩盤中の物質移動評価のためのパラ メータ(割れ目幅、坑道周辺の動水勾配、分散長など)を取得できる見通しを得た。さらに、深 度500m研究アクセス南坑道において、1本の新規ボーリング調査を実施し(図3・1:16MI59号孔)、 透水性割れ目の分布や連続性などを評価するためのデータを取得した。なお、本調査は電力中央 研究所との共同研究として実施したものである(第4章参照)。

また,深度200~400mのボーリング孔から採取した地下水および深度500mの冠水坑道の周囲 に掘削したボーリング孔と冠水坑道内の地下水を対象として,コロイドやそれらと地下水中の 様々な元素の相互反応に関わる調査を行った。ろ過地下水と未ろ過地下水の化学分析値を比較し たところ,地下水中の金属元素や希土類元素の数十%が0.1µm以上の粒子と共に存在しているこ とが確認された。地球化学計算コードPHREEQCを利用して希土類元素の主要な溶存化学種を推 定した結果,希土類元素は主に炭酸錯体を形成していると推定された。さらに,炭酸錯体が付着 しやすい炭酸塩鉱物に希土類元素が付着してコロイドを形成している可能性が考えられた。

冠水坑道では人為由来コロイドとしてバイオフィルム,ZnSからなる粒子が観察される特徴が あった。また、坑道周辺の地下水に比べ鉄を含む粒子が多い一方で、溶存態およびコロイド態の 希土類元素濃度が有意に低い特徴が認められた。冠水坑道内には人為由来物質として側壁に吹付 コンクリート、床面にバイオフィルム(一部に粘土材料)があり、地下水中の希土類元素がこれ らに付着することで除去された可能性が考えられた。これらのことから、花崗岩中に坑道を掘削 することで、バイオフィルムや亜鉛、鉄を含むコロイドが新たに形成される一方で、希土類元素 を含むコロイドはセメント材料や粘土材料などに捕捉され、その移動が抑制されることが明らかになった。

2 室内試験

2015年度までに、花崗岩健岩部における物質移動現象の理解を目的として、肉眼観察で割れ目 周辺母岩が変質を被っていない花崗岩試料(ここでは、肉眼観察で熱水変質を被っていないと判 断できる花崗岩を「健岩」と示す)を対象として、空隙の特徴とその成因について検討してきて いる。2016年度は、2014年度に実施した透過拡散試験で得られた実効拡散係数、水銀圧入法で得 られた空隙率45)および岩石薄片の実体顕微鏡観察結果を用いた画像解析により推定した空隙 率46,47)との関係性を検討し、空隙と拡散現象の関係ついて検討を行った。

2014年度に実施した透過拡散試験では、表3.2.1-1に示す岩石試料(健岩試料が3試料,変質試 料が3試料の計6試料)を対象として実施している45)。これらの試料に対して実施した水銀圧入法 で得られた空隙径の分布を図3.2.1-1に示す。空隙径については、定性的ではあるが健岩試料に比 較して変質試料の方が、0.1~1.0um程度の微細な空隙が多い傾向が認められる。なお、空隙径分 布のうち、2.0µm以上は測定セルの影響で発生している可能性があることから、表3.2.1-1に示す 水銀圧入法に基づく空隙率(PMP)は、空隙径のうち0.02~2.0umの値として算出している45)。 PMIPは、10MI25号孔の22.268mで採取した試料を除けば、変質試料の方が高い値を示す。この PMIPと非収着性トレーサーであるウラニンの実効拡散係数との比較を行った結果、空隙率と実効 拡散係数間には正の相関が認められるが、その相関性は低いことが確認された(図3.2.1-2a)。-方,岩石薄片観察から推定した空隙率(P2D)とウラニンの実効拡散係数を比較した結果 (図3.2.1-2b), PMIPに比較して高い相関が得られた。このことから、薄片画像で抽出された空隙 は、拡散経路として機能している可能性が考えられる。なお、取得した薄片画像の解像度は1pixel あたり6µm程度であることから、P2DはPMIPに比較して大きな空隙の分布を定量化していると考 えられる。すなわち、花崗岩マトリクス中での拡散現象は、主に大きな空隙を介している可能性 が考えられ、このような空隙の特徴を検討する上では、岩石薄片を用いた検討が有効である可能 性が見いだされた。

	-	•				~
				空隙 ³	率(%)	
試料の産状	試料	·採I	取位置	画像解析による 推定結果	水銀圧入法	ウラニンの 実効拡散係数 (De; m²/s)
健岩	12MI30	:	15.840m	2.51	0.40	7.15E-14
健岩	12MI31	:	7.830m	3.23	0.80	8.49E-14
健岩	12MI30	:	5.250m	1.45	0.26	9.43E-15
変質	10MI25	:	22.268m	3.98	0.17	3.72E-13
変質	10MI25	:	20.782m	4.15	0.96	1.01E-13
変質	10MI24	:	13.221m	6.30	1.41	8.14E-13

表3.2.1-1 検討対象試料と空隙率および実効拡散係数



図3.2.1-1 水銀圧入法に基づく空隙径分布の推定結果



図 3.2.1-2 空隙率(a:P_{MIP}, b:P_{2D})とウラニンの実効拡散係数の関係

③ モデル化

2016年度は、3.3.1 1)節に示す再冠水試験に伴う冠水坑道内と周辺岩盤中の地下水の水圧およ び水質分布やそれらの回復挙動に基づき、亀裂ネットワークモデル構築の基礎情報となる坑道周 辺岩盤の水みちとなる割れ目分布を概念化した(図3.2.1-3)。割れ目分布の概念化にあたっては、 冠水坑道周辺で観測された地下水の水圧分布の変化から冠水坑道周辺岩盤の水理学的領域区分を 推定し、水質分布の変化から地球化学的領域区分を推定した。水理学的な領域区分からは、冠水 坑道壁面と観測区間との間の岩盤中の割れ目分布の概念化が可能である。冠水坑道内との水圧変 化の類似性が高いと判断される観測区間は、主に透水性の高い割れ目で冠水坑道と連結しており、 水理学的な連続性が高いと解釈した。一方、水圧変化の類似性が低いと判断される観測区間は、 主要な水みちとなる透水性の高い割れ目がなく、主に透水性の低い割れ目で冠水坑道と連結して おり、水理学的な連続性が低いと解釈した。また、地球化学的領域区分からは、観測区間からよ り外側の岩盤中の割れ目分布の概念化が可能である。地下水中の塩化物イオン濃度が深度500m における平均的な値よりも高い、もしくは低い地下水が継続的に流入していると推定される観測 区間は、鉛直方向の割れ目が多く分布し、それぞれ深部および浅部との連結性が高いと解釈した。 塩化物イオン濃度に顕著な変化が見られない観測区間については、水平方向の割れ目が多く分布 しており水平方向からの地下水流動が卓越していると解釈した。

構築した冠水坑道周辺岩盤の割れ目分布の概念と、坑道壁面および周辺ボーリング調査で観察 された割れ目分布との比較を実施した(図3.2.1・4)。坑道部の割れ目としては、坑道壁面におけ る地質観察で湧水・滴水が確認された割れ目を抽出し、観察されたトレース長を直径とする円盤 モデルで表示した。また、ボーリング孔沿いの割れ目は、ボアホールテレビ観察で明瞭・開口割 れ目を抽出し、半径5mの円盤モデルで表示した。割れ目分布の概念と地質調査結果から抽出され た割れ目分布の整合性は高く、割れ目分布の概念において、冠水坑道との水理学的な連続性が高 いと考えられる観測区間には、調査結果からも水みちとなりうる割れ目の分布や、冠水坑道部の 割れ目との連続性が確認できる。一方、水理学的な連続性が低いと考えられる観測区間には、調 査においても冠水坑道への水みちとなりうる割れ目が確認されていない。また、地質調査から推 定される割れ目の傾斜と割れ目分布の概念も調和的である。これらのことから、冠水坑道周辺で 観測された地下水の水圧および水質分布やそれらの回復挙動に基づき構築した坑道周辺岩盤の割 れ目分布の概念は妥当であると考えられる。今後は、上記の割れ目分布の概念を基礎情報として、 冠水坑道周辺岩盤における割れ目の不均質性を考慮したモデル化・解析を行う予定である。

また,研究坑道掘削に伴う地下水流動状況の変化に関するデータなどに基づく水理地質構造モ デルの更新の支援を目的として,逆解析手法を組み込んだ地下水流動特性の評価手法に関する検 討を継続的に実施している。2016年度は,清水建設株式会社との共同研究(第4章参照)として 検討を行った。

さらに、ボーリング調査や物理探査などで得られたデータや情報の解釈、地質構造/水理地質 構造のモデル化・地下水流動解析およびモデル化・解析結果の可視化に関する作業を通じて、 GEOMASS(Geological Modeling Analysis and Simulation Software)システム⁴⁸⁾の拡張を継 続的に実施している。2016年度は、主に抽出されたシステムの問題点の改善および機能の拡張を 行った。



図3.2.1-3 冠水坑道周辺岩盤の割れ目分布の概念化



図3.2.1-4 岩盤の割れ目分布の概念と割れ目の調査結果の比較(平面図)

3.2.2 地質環境の長期変遷解析技術の開発

(1) 目的

変動帯に位置する日本において、自然現象が地質環境に与える影響範囲や影響の大きさを評価することは、地層処分の長期安全性を評価していく上でも重要な課題である。そのため、これま

でに取得してきた情報や研究坑道で取得される情報などに基づいて、断層活動や隆起・侵食など の自然現象が地質環境に与える影響の範囲や大きさを評価する技術を構築する。

また,過去の地質環境特性を把握する技術を構築し,その技術に基づき過去から現在までの地 質環境の長期変遷を解析する。その結果に基づいて,地質環境特性の長期的な変遷を解析する技 術を整備するとともに,将来予測の考え方および方法論を提示する。

(2) 実施内容と結果

2016年度は、断層による影響と、割れ目と鉱物の形成履歴について検討を行った。断層による 影響について、主立坑で観察された断層(以下、主立坑断層)沿いの割れ目の特徴と透水性を調 べた結果、割れ目の充填物の形成が、地下水の移動を抑制していることがわかった⁴⁹⁾。また、こ れらは比較的高い温度で形成された割れ目や鉱物であることを確認した。

断層による影響

断層による影響については、2015年度までに深度500m研究アクセス北坑道などで実施した壁 面観察とボーリング調査の結果(割れ目の密度,走向・傾斜,充填物の種類や特徴,湧水の程度, 透水性)に基づいて,主立坑断層から約100m区間における割れ目の特徴と,水理学的特徴が調 べられている^{50,51)}。2016年度は,坑道壁面の割れ目頻度(1平方メートルあたりの割れ目の本数) の変化などを解析した。その結果,断層から水平距離で約60mまでの領域は,割れ目頻度が高い 傾向が認められる⁴⁹⁾(図3.2.2-1a;以下,この領域をダメージゾーンという)。トレース長(壁面 で計測した割れ目の長さ)別にみると,ダメージゾーンではトレース長の比較的長い割れ目の頻 度が高い(図3.2.2-1b)⁴⁹⁾。このダメージゾーンの幅は,主立坑断層の断層ガウジの幅から,既 存の経験式を用いて求められるダメージゾーンの幅は,主立坑断層の断層ガウジの幅から,既 層による物理的な影響領域と考えられる。なお,ボーリング調査の結果(図3.2.2-1c)では,一 部で割れ目頻度の増加が認められるものの,ダメージゾーンの領域に対応する特徴は把握できな かった。この原因は,ボーリング調査では,短い割れ目を捉えられない場合があるためと考えら れる。

主立坑断層から約100m区間における割れ目の充填物を調べた結果,緑泥石と絹雲母(以下, 熱水性鉱物),方解石および未固結の粘土状の充填物(以下,粘土状充填物という)が認められた⁴⁹。

粘土状充填物は,主にダメージゾーンの範囲内に認められる(図3.2.2-1d)。顕微鏡観察の結果, 粘土状充填物は,鉱物片とそれを埋めるスメクタイトで構成される⁴⁹⁾。岩片は,その長軸方向が 配列すると共に割れ目面近くと中心付近で粒径が異なる傾向がある。また,一部では粘土状充填 物で充填される割れ目面近傍に水圧破砕様の産状も認められる。スメクタイトは絹雲母と低温の 地下水との反応で形成されることが知られている。また,主立坑断層は複数回活動したとされて いることから,粘土状充填物は,1)熱水性鉱物の充填,2)天水の流入に伴うスメクタイトの形成,3) 断層活動に伴う高間隙水圧の形成と充填物の移動・圧入によって形成されたと考えられる⁴⁹⁾。

透水量係数は、ダメージゾーンとその周辺領域とを比較すると、ダメージゾーンの方が低い傾向があり、湧水を伴う割れ目からの湧水量もダメージゾーンの方が低い傾向がある(図 3.2.1-1e, f)。ダメージゾーンでは、短い割れ目は主に熱水性鉱物や方解石で充填・閉塞され、長い割れ目 は粘土状充填物で充填される。一方で、ダメージゾーンの周辺領域では、長い割れ目に熱水性鉱 物や方解石による充填や一部閉塞が認められる。以上より、断層周辺に形成されるダメージゾー ンは、断層形成以降の地下水の流入や断層の再活動により、その領域の割れ目が充填・閉塞され ることにより、長期的には透水性が低下する可能性が見いだされた 490。



図 3.2.2-1 深度 500m 研究アクセス北坑道における壁面観察およびボーリング調査結果に基づく 割れ目頻度・充填物および透水量係数の分布とダメージゾーンの範囲^{49) より引用加筆}
② 割れ目と鉱物の形成履歴

土岐花崗岩の割れ目と鉱物の形成履歴については、2016年度から検討を開始した。まず、比較 的初期に高温条件で形成された空隙や割れ目に着目した。既存文献によると、土岐花崗岩には、 鉱物の溶脱に伴う空隙と充填が認められている⁵²⁾。また、石英の微細割れ目中に流体包有物が閉 じこめられた温度は300~400℃⁵³⁾と報告されていることから、高温流体が関与した可能性がある。

そこで、立坑壁面調査およびボーリング調査の結果を踏まえて、貫入岩の分布と、高温条件を 示す組織を調べた。主立坑断層に沿って分布する貫入岩は、火山岩質組織を置換した変質鉱物が 認められ(図3.2.2-2c)、安山岩質の全岩化学組成を示すものが認められることから、高温の溶岩 が花崗岩中に入った可能性がある。この貫入岩の分布を詳しくみると、花崗岩のほぼ鉛直の割れ 目に沿って貫入した様子が、約800mの区間で断続的に認められる(図3.2.2-2a)。立坑壁面の一 部では、貫入岩と花崗岩の側面境界は直線的であり、幅数cmの細粒均質のゾーンが認められてい る⁵⁴⁾。また、一部断続する貫入岩下部の形態は紡錘状を示す(図3.2.2-2b)。これらの特徴から、 花崗岩が冷却して開口性の割れ目が形成された後、割れ目に沿って、高温の溶岩が地下深部から 上昇したと考えられる。溶岩の貫入後、比較的高温の状態で花崗岩が弾性的に変形すると、貫入 岩下部のネッキングが生じることが知られており⁵⁵⁾、同様の温度条件で形成されたものと考えら れる。なお、境界付近の花崗岩の一部にはセリサイトが発達し、熱水変質が生じている。

一般に、花崗岩の岩体形成直後の温度は、地下深部から地上に向かい低下する。この岩体中を 高温流体が上昇する場合、流体の温度は徐々に低下する。この際、シリカ(SiO₂)の溶解度は、400℃ 程度で一旦低下し、350℃程度で増加、300℃程度で再び低下する⁵⁶⁾。空隙や割れ目に沿って高温 流体が繰り返し上昇している地域では、約400℃に相当する深度で、石英脈が発達し、遮水帯を 形成する場合がある^{56,57)}。高温流体の痕跡に着目し、研究所用地内で掘削したMIZ・1号孔で採取 したコアの観察と薄片観察を行った。薄片観察の結果、貫入岩近傍において、鉱物の溶脱に伴う 空隙と充填のほか、緑泥石結晶中の細粒自形黒雲母が認められた。また、コア観察の結果、割れ 目と空隙を充填した石英が、深度500m付近に偏在する傾向が認められた。特に深度約500m~ 560m(掘削長約500m~560m)の区間は、石英脈や石英に富む部分(石英に富むペグマタイト 質およびアプライト質の花崗岩)が分布し、割れ目が比較的少ない(図3.2.2・3 a,d)。また、この 区間の岩石薄片には、割れ目を充填する黒雲母も認められ、高温流体の関与が推定された。この 深度付近の花崗岩は10⁻¹⁰m/sオーダーの透水係数を示し、透水性は比較的低い(図3.2.2・3 b)。一 方、石英に富む領域より浅部と深部の両側には、高角度傾斜の連続的な割れ目に関連する比較的 透水性が高い区間がみられる(図3.2.2・3 b,c)。このような石英に富む低透水性の領域と連続的な 割れ目に関連する高透水性の領域は、水平方向に連続する可能性がある。

JAEA-Review 2017-026



図 3.2.2-2 貫入岩の分布と組織

a:花崗岩中の貫入岩の分布(赤丸)と北西・南東走向の割れ目(水色四角) b:主立坑壁面の貫入岩と割れ目(深度265m付近の北西壁面)

c:貫入岩の薄片にみられる火山岩質組織と変質鉱物(クロスニコル; MIZ-1 号孔)



図 3.2.2-3 MIZ-1 号孔における石英に富む領域および割れ目の分布と透水性

MIZ-1 号孔のコア観察等の結果。a:岩相(花崗岩中の貫入岩と石英に富む部分。網掛けは石英に富む領域。), b:単孔透水試験区間とその透水係数, c:高角傾斜の連続的な割れ目,d:コアに認められる割れ目の傾斜。

3.2.3 深部塩水系地下水の起源・滞留時間の理解

(1) 目的

研究所用地の地下深部で認められる塩水系地下水が存在する地質環境は、降水量の多さに起因 して涵養量が多い日本でも、随所で観察されている。深部地下水の洗い出しの現象を考慮に入れ ても、長期滞留する地下水環境が地下深部に存在することを示すことは、地層処分における安定 した地質環境の存在を示す重要な事例となる。そのため、地下水流動の緩慢さを明らかにするた め、1,000mより深部の塩水系地下水を対象とした調査・分析などを行う。

(2) 実施内容と結果

研究坑道内からの大深度ボーリング孔の掘削・調査について,既存技術の情報収集を行い,実 施計画について検討した。

このうち,地下水の滞留時間を推定する手法(年代測定法)については,地下深部に存在が想 定される滞留時間の長い塩水系地下水に適用できる推定方法を選定するために,国内外において, これまで適用されてきた年代測定法に関する情報収集を実施した⁵⁸⁾。

その結果,これまで広く用いられている炭素の放射性同位体(14C:半減期5,730年)に加えて, 塩素の放射性同位体(36Cl:半減期301,000年)およびヘリウムの安定同位体(4He)を用いる方 法が有効であることがわかった。また,深度500mの研究坑道において得られた地下水を対象と して,14Cによる年代測定を実施した結果,地下水の年代が20,000~35,000年と推定された。

3.3 坑道埋め戻し技術の開発

坑道の一部を埋め戻し,地下水で自然に冠水させることによって,地下水の水圧および水質, ならびに坑道周辺岩盤の化学的・力学的変化を観測し,地質環境の回復能力などを評価するとと もに,地質環境に応じた埋め戻し技術の構築を行う。また,長期観測に必要なモニタリング技術 を開発する。

3.3.1 坑道閉鎖に伴う環境回復評価技術の開発

1) 再冠水試験

(1) 目的

深度500m研究アクセス北坑道の先端約40mの冠水坑道において、止水壁を設置して地下水で 坑道を冠水させ、坑道周辺岩盤における力学・水理・化学変化を観測する。観測データに基づき、 坑道閉鎖後の水圧回復プロセス、坑道周辺の応力状態、化学状態について、坑道閉鎖時の環境回 復に関わる具体的な観測技術、解析技術(亀裂や断層の多い日本の結晶質岩を念頭においた調査・ 解析技術)を提案する。

(2) 実施内容と結果

2016年度は、深度500m研究アクセス北坑道の冠水坑道周辺に掘削したボーリング孔(12MI33, 13MI38~48号孔:図3.3.1-1)に設置した観測装置を用いて、冠水後の地下水の水圧・水質および岩盤変位の観測を継続した。さらに、冠水坑道入口に設置した止水壁の機能確認試験(止水性を確認する試験)を含め、冠水坑道内と周辺岩盤中の地下水の水圧・水質の変化、岩盤変位の観測を継続した。

また,2014年度に埋め戻し材(砂,粘土など)で埋め戻した13MI39号孔,13MI42号孔のボー リングピット2箇所において,埋め戻し材および周辺岩盤での水理・化学・力学的な変化の計測 を継続した。

2016年1月の坑道冠水以降,冠水坑道内の水圧は3週間ほどで約3MPaまで上昇した。その後, 止水壁からの地下水の流出および周辺の岩盤からの地下水湧水により徐々に水圧が低下したもの の,1年経過後はほぼ一定の値(約2.4MPa)となっている(図3.3.1-2)。冠水坑道周辺の地下水 の水圧は,冠水坑道壁面で観察された湧水を伴う割れ目と連続すると推定される観測区間におい て,坑道掘削により1~2MPaまで低下していた地下水の水圧が,冠水坑道と同等の水圧にまで上 昇した。一方で,冠水坑道で観察された割れ目との連続性が乏しいと推定される領域では,坑道 冠水前からの水圧(約3MPa)を維持しており,坑道冠水以降の水圧変化は小さいことが確認さ れた。13MI39号孔,13MI42号孔のボーリングピットの埋め戻し材での観測では,冠水坑道内の 水圧変化に伴い,埋め戻し材中の水圧,土圧の変化が確認され,ピット内の埋め戻し材がほぼ飽 和状態に達していると推定された。

冠水時にトレーサーとして地下水に添加したウラニンの濃度は、坑道冠水の直後から減少しは じめ、約220日後には初期値の約1割程度(0.03mg/L)まで減少した。止水壁付近で認められた 湧水のウラニン濃度を測定したところ、冠水坑道内の地下水と同等の濃度であったことから、冠 水坑道内の地下水が止水壁の周囲から坑道外へ浸み出していると考えられた。また、水ー岩石反 応の影響を受けにくい地下水中の塩化物イオン濃度は、再冠水試験の直後は480mg/Lを示してい たが、その後徐々に減少し、400mg/Lへ収斂する傾向を示した。塩化物イオン濃度の変化は、周 囲の地下水の流入に伴うトレーサー濃度の変化に基づいて計算される値と類似しており、周囲の 地下水の流入により経時的に変化していると考えられる。一方で、ケイ素、鉄、ナトリウム、カ リウム、アルミニウム、硫黄濃度は、冠水坑道内外の地下水の混合を仮定した計算値と合致せず、 冠水坑道内での水ー岩石反応の影響を受けていると考えられる。

また、冠水坑道内の地下水は、当初、地下水が空気に触れていたため溶存酸素を含む酸化的な 状態にあったが、冠水坑道の閉鎖後は、地下水中の溶存酸素濃度がトレーサー濃度の変化と無関 係に急激に減少した。さらに、地下水の酸化還元状態に関わる指標である酸化還元電位も時間と ともに低下し、坑道掘削直後の酸化還元電位と同等の値(約-180mV)となった(図3.3.1-3)。こ れらのことから、坑道の掘削に伴い変化した地下水の水圧や酸化還元状態は、坑道冠水以降、数 か月程度で元の状態に回復することが確認された。酸化還元状態を反映しやすい硝酸、亜硝酸、 硫酸濃度は、坑道冠水以降順次低下し、このような変化は、微生物による還元作用に特徴的な変 化であることから、微生物活動により地下水が還元されたと考えられた。地下水中の微生物全菌 数は、冠水前の地下水で1.1×10³cells/mLであったのに対し、坑道冠水直後には5.3×10⁵cells/mL へ増加した。また種組成は、冠水前は好気性菌種である*α - Proteobacteria*に属する種が優占種と して存在していたが、約60日後には一般的に好気性~通性嫌気性であるγ - *Proteobacteria*や *Verrucomicronia*に属する種が増加する傾向が認められた。その後、発酵反応や硫酸還元反応に 関与する*Firmicutes*や*δ* - *Proteobacteria*に属する嫌気性菌が優性種として増加した。

地下水のpHについては、坑道冠水以降、坑道壁面のセメント等との反応により徐々に上昇しア ルカリ状態となっており(図3.3.1-3)、元の状態と大きく異なることが確認された。冠水坑道に おいて地下水と反応する鉱物は、花崗岩中の鉱物と吹付コンクリート中の鉱物が想定できる。一 般的に施工養生後の普通ポルトランドセメント(以下,OPC)の硬化物には、KOH, NaOH, Ca(OH)₂, エトリンガイト(C₆As₃H₃₂), CSHゲル、ハイドロガーネット(C₃AH₆)などの水和 物が含まれる。()内の略称はC:CaO, A:Al₂O₃, H:H₂O, s:SO₃を示す。冠水坑道の水質の経時 変化には、pHの上昇の他にケイ素、鉄、ナトリウム、カリウム、アルミニウム、硫黄濃度が増加 するという特徴があり、吹付コンクリートからカリウム塩やナトリウム塩、Ca(OH)₂、エトリン ガイト、CSHゲル、ハイドロガーネットの溶解によってpHが上昇した可能性がある。理論的に、 これらの各成分の溶解量に応じてpHは11~13程度まで上昇する(図3.3.1-4)。



図 3.3.1-1 冠水坑道周辺における観測孔の概要



図 3.3.1-2 冠水坑道内の地下水の水圧変化



図 3.3.1-4 各セメント水和物の溶解に伴う冠水坑道地下水の pH 変化

2) 岩盤の破壊現象評価

(1) 目的

坑道周辺岩盤の掘削影響領域では,既存亀裂の開閉あるいは新たな亀裂の発生が生じることが あるため,物質の選択的な移行経路になる。この掘削影響領域の発生は,初期応力状態,岩盤物 性,掘削工法に依存する。掘削影響領域を含む坑道周辺岩盤が,坑道埋め戻しの際の外側境界に 接する領域となるため,坑道埋め戻し後の周辺岩盤の長期的な挙動の評価にあたっては,初期応 力と埋め戻し材の膨潤圧との力学的な釣り合いの評価が特に重要である。このため,坑道掘削か ら埋め戻しまでを想定した周辺岩盤における破壊挙動とその後の変化を評価することは重要な課 題である。ゆえに,岩盤の掘削影響や熱負荷に伴う岩盤挙動,特に長期挙動を含めた力学モデル や解析手法の高度化が課題である。そのため,大口径ボーリング孔の掘削による孔壁破壊現象の 調査や岩盤の破壊現象を含む長期岩盤挙動の評価手法の開発を行い,坑道掘削から埋め戻しまで を想定した周辺岩盤における破壊挙動とその後の変化を評価する方法を整備する。

(2) 実施内容と結果⁵⁹⁾

京都大学および(株)大林組との共同研究(第4章参照)として,2015年度に,深度500m研究 アクセス北坑道においてボーリング孔を掘削し,粘性の異なる流体(水および二酸化炭素)を注 入して岩盤に亀裂を生じさせ,その時の孔周辺岩盤中の破壊挙動をAE(Acoustic Emission)観 測によりモニタリングした。具体的には,図3.3.1-5に示す中央の流体圧入孔(直径86mm)を現 場床面から鉛直下向きに4~6m程度掘削し,流体注入孔を取り囲むように深度10m程度のAE観測 孔(直径66mm)を4本掘削した。その後,流体圧入装置により流体圧入孔に破砕流体(水および 流体CO₂)を注入し,岩盤を水圧破砕した。水圧破砕き裂の発生時に生じたAEを,各AE観測孔 に4個ずつ配置した計16個のAEセンサーで受振した。注入試験における圧力-流量曲線の例を 図3.3.1-6に示すが,各々の流体注入時の流量を途中で変化させて試験を実施している。



図 3.3.1-5 試験レイアウトの模式図

2016年度は、この原位置試験で得られた粘性流体注入時の流量変化やAE計測データなどの詳細な検討を実施した。

流体圧, AE発生頻度グラフ, 圧入流量を図3.3.1-6に示した。この図から, 圧入流量が10 mL/min の時に1回, 圧入流量を30mL/minに増やした直後に1回, BD (Break Down: 圧力上昇による岩 盤の破壊)が起きたことがわかる (図3.3.1-6中の黒四角部分)。この時発生したAEの波形データ から震源を求め, 震源分布の経時変化を調べることで, 亀裂が進展したとされる時間帯を特定し た。また, AEの震源メカニズムをP波初動の放出パターンを利用して推定した。一般に観測点が AE震源を一様に取り囲んでいる時, せん断破壊型のメカニズムを持つAEが発生した場合は, 押 し波と引き波はそれぞれ50%程度の割合で観測される。一方, 亀裂の開口といった引張破壊型の 震源メカニズムを持つAEの場合は, 観測される押し波の割合が100%に近くなる。今回, 各AE を収録した16個のセンサーのうち押し波を観測したセンサーの割合 (以下, 押し波の割合)を求 めることで, BD時に発生したAEの震源メカニズムを推定した。

図3.3.1-7は図3.3.1-6枠線内で囲まれた、2回目のBD時に発生したAEイベントにおける押し波の割合を表している。図中では押し波の割合が80%を超えるものを黒色の三角で、それ以外を黒色の点で示している。全体的に押し波の割合が40~60%のイベントが多く発生しているものの、新規き裂の造成が確認された破線枠内の時間帯では、押し波の割合が高いイベントがいくつか発生していることが分かる。押し波の割合が高いこれらのイベントは、それまでの震源分布の縁辺に位置していることから、空間的にも新規き裂の造成に伴うものと推測される。1回目のBDでも同様の傾向が見られたことから、BD時のき裂造成メカニズムはせん断破壊型が支配的であるものの、新規き裂造成時には引張破壊が発生すると考えられる。



図 3.3.1-6 実験で得られた流体圧・AE 発生頻度・圧入流量図



図 3.3.1-7 AE の押し波の割合(図 3.3.1-6 枠線内)

この他に、地中レーダを用いた掘削影響領域の水理特性の評価についての調査を鹿島建設㈱と の共同研究として実施した(第4章参照)。また、トンネルの破壊現象に関する事例調査を行うと ともに、岩盤の破壊現象や長期岩盤挙動に関わる室内試験などを実施した。

3) 埋め戻し試験

(1) 目的

研究坑道の埋め戻しの準備に反映することを目的として、ピットや坑道の埋め戻し試験を実施 する。これらの試験を通じて得られた埋め戻しの施工管理に関わる留意点や地質環境への影響な どに関する知見に基づき、環境回復に適した施設閉鎖技術やその手順を提示する。これにより、 地層処分において用いられる埋め戻し材やプラグといった人工材料が地質環境に与える影響を評 価するための技術基盤を整備することができる。

(2) 実施内容と結果

2016年度は、ピットの埋め戻し試験の各種モニタリングを継続し、観測機器の適用性や耐久性 に関するデータを取得した。また、坑道の一部を利用した埋め戻し試験の計画立案に資するため、 埋め戻しに求められる要件などについて整理するとともに、埋め戻し試験の概念的な検討を実施 した。

3.3.2 長期モニタリング技術の開発など

地下施設の操業から閉鎖過程および閉鎖後に至る地下水の水圧・水質の変化をモニタリングす る技術と、大規模地下施設の閉鎖が地質環境に与える影響の評価手法の構築を目指した研究開発 を行う。

(1) 長期モニタリング

① 地上におけるモニタリング

研究所用地内に設置した気象観測装置による降水量などの観測,ボーリング孔(04ME01号孔) を利用して地表付近の地下水の水位の観測,土壌水分量の観測を継続した(図3.3.2-1)。また, 研究坑道周辺における坑道掘削に伴う地下水の水圧・水質変化の把握を目的として,地上のボー リング孔(MSB-1~4号孔, MIZ-1号孔,05ME06号孔)において,地下水の水圧・水質の観測を 継続した(図3.3.2-1)。その結果,これまでの観測結果と同様に,地表付近の地下水位や土壌中 の水分量に,研究坑道の掘削による影響とみられる変化がないことが確認された。なお,土壌水 分量の観測については2017年2月をもって終了した。

地上のボーリング孔を用いた地下水の水圧・水質観測では、主立坑断層を境として、地下水の 水圧の大きさや研究坑道内の作業に伴う地下水の水圧の変化量が異なることから、主立坑断層が 研究所用地周辺における地下水の水圧分布に大きな影響を与えていることを引き続き確認した (図3.3.2-2)。

また,地下水の水質に関しては,主に堆積岩中の地下水の観測を継続した結果,一部の観測区間で水質の変化が認められ,研究坑道への地下水の湧出による周辺地下水への影響と考えられた(図3.3.2-3)。



図3.3.2-1 地上から掘削されたモニタリング孔



※1 全水頭:ボーリング孔の各区間で観測された水圧を水の高さに換算した値

① 2016年熊本地震(2016/4/16発生)による変化

図3.3.2-2 地上からの水圧モニタリングの一例(MSB-1, 3号孔)



図3.3.2-3 地上からの水質モニタリングの一例(MSB-4号孔)

② 研究坑道におけるモニタリング

研究坑道の掘削や維持管理,再冠水試験に起因する坑道周辺の地下水の水圧分布やその長期変 化を把握するため,表3.3.2-1に示すボーリング孔において地下水の水圧・水質の観測を継続した。 また,坑道壁面や集水リングで採取した地下水の水質分析を継続した。さらに,深度300mステ ージにおいて自然電位測定による地下水流動変化のモニタリングを継続した。

設置場所	孔の名称	孔の方向	掘削長					
水圧観測孔								
深度200mボーリング横坑(主立坑)	07MI08号孔	鉛直下向き	125.0m					
深度200mボーリング横坑(換気立坑)	07MI09号孔	鉛直下向き	125.0m					
深度300mボーリング横坑(換気立坑)	09MI17-1号孔 09MI18号孔 09MI19号孔	鉛直下向き	51.0m					
深度300m研究アクセス坑道	10MI23号孔	水平方向	109.7m					
深度500m研究アクセス南坑道	12MI32号孔	水平から約3°下向 き	106.4m					
水圧	·水質観測孔							
深度200m予備ステージ	07MI07号孔	水平から約5°下向 き	55.3m					
深度300m予備ステージ	09MI20号孔	水平から約3°下向 き	102.0m					
深度300m研究アクセス坑道 (産総研との共同研究において掘削)	09MI21号孔	水平から約3°下向 き	103.0m					
深度400m予備ステージ	10MI26号孔	水平から約2°上向 き	70.6m					
深度500m研究アクセス南坑道	12MI32号孔	水平から約3°下向 き	106.4m					
※ 度 500	12MI33号孔	水平から約1°下向	107.0m					
保度300m研究/グビベ北規道	13MI38号孔	き	102.1m					
	13MI39号孔	鉛直下向き	$16.5 \mathrm{m}$					
	13MI40号孔	水平から約4°下向	16 Gm					
 深度500m研究アクセス北坑道	13MI41号孔	き	10.0111					
····································	13MI45号孔							
	13MI46号孔	鉛直下向き	2.3m					
	13MI47号孔		2.0111					
	13MI48号孔							

表3.3.2-1 水圧観測孔および水圧・水質観測孔

深度300m研究アクセス坑道のボーリング孔(10MI23号孔)での観測結果では、区間5(坑道 壁面に近接する区間)と区間1~4において異なる水圧変化の傾向を示している。このことから、 坑道の掘削(開放)の影響は壁面近傍に限られ、岩盤中では坑道掘削後も高い水圧を保持し続け ていることが確認された(図3.3.2-4)。

地下水の水質については、集水リングにおける水質の長期観測の結果、堆積岩と花崗岩の不整 合部より深部に設けられた主立坑集水リングにおいて、水質の季節変動が認められた(図3.3.2-5)。 不整合部から花崗岩上部において立坑への湧水量も多いことから、この深度において浅層地下水 が立坑に流れ込んでいると推測された。



※1 全水頭:ボーリング孔の各区間で観測された水圧を水の高さに換算した値

—— 区間 1 (74.86 ~ 109.70m) ^{※2}	—— 区間 4(17.76 ~ 39.01m)
—— 区間 2(51.66 ~ 73.91m)	—— 区間 5(0.00 ~ 16.81m)
—— 区間 3(39.96 ~ 50.71m)	

※2 各区間の m は、ボーリング孔の坑口からの観測地点までの距離

図3.3.2-4 深度300mにおける水圧モニタリングの一例(10MI23号孔)



図3.3.2-5 立坑における水質モニタリングの一例(主立坑集水リング)

(2) 長期モニタリング技術の開発

研究坑道内に設置された地下水の水圧・水質および岩盤変位をモニタリングする装置を利用して,地上から地下水の水圧・水質,岩盤変位を長期モニタリングする方法,地中無線によるデー

タ伝送方法(原子力環境整備促進・資金管理センターとの共同研究),レーザー光による給電技術 など(静岡大学との共同研究)の検討を行った(第4章参照)。

地中無線によるデータ伝送技術の適用試験として,地中無線システムを用いた冠水坑道の水圧 計測を継続し,花崗岩中においても地中無線システムによる水圧計測,データ転送が適用可能で あることを確認した。

(3) モニタリングデータの取りまとめ・評価

地上から掘削したボーリング孔および研究坑道から掘削したボーリング孔を利用した地下水の 水圧・水質のモニタリングデータを取りまとめ,評価した。その結果,研究坑道周辺の地下水の 水圧低下傾向と水質の変化を把握することができた。

3.4 正馬様用地における調査研究

(1) 目的

既存のボーリング孔における地下水のモニタリングを継続し,月吉断層やその周辺の不連続構 造を含む結晶質岩中の地下水流動を把握するための調査技術を開発する。

(2) 実施内容

1) 地下水長期モニタリング

地下水長期モニタリングでは2015年度に引き続き, AN-1, MIU-2, MIU-3, MIU-4号孔にお いて, MPシステムを用いて, 地下水圧のモニタリングを継続した。

AN-1号孔のモニタリング区間は、月吉断層の上盤側に設定している。また、MIU-2、MIU-3、 MIU-4号孔は月吉断層を貫通しており、断層の上盤側、下盤側それぞれにモニタリング区間を設 定している。観測孔の位置を図3.4-1に示す。各孔のモニタリング区間の地質は全て土岐花崗岩で ある。

正馬様用地内では、月吉断層上盤側と下盤側で全水頭に差が生じており、上盤側より下盤側の 方が高い全水頭を示している(図3.4-2)。この結果は、月吉断層が断層面に直交する方向に対し 低透水性であるというこれまでの調査結果¹⁶⁾と整合的であり、月吉断層の水理特性に関する解釈 の妥当性を裏付ける結果が得られている。また、MIU-4号孔では2016年4月の熊本地震の影響と 考えられる全水頭の変化が生じ、月吉断層上盤側では上昇、下盤側では下降と月吉断層を挟んで 異なる傾向を示した(図3.4-2)。この現象は正馬様用地内のMIU-2、MIU-3号孔でも生じており、 月吉断層の不連続性や月吉断層の水理特性に関する解釈の妥当性を裏付ける結果の一つと考えら れる。



図3.4-1 モニタリング孔位置図(正馬様用地内)



MIU-4号孔

- 49 -

3.5 施設建設

(1) 施設建設の概要

研究坑道の工事としては、深度500m研究アクセス南坑道においてポストグラウチングを実施 した(3.1.1参照)。また、坑内外仮設備の維持管理作業のほか、老朽化した配管などの撤去や交 換、主立坑エレベーターのワイヤロープの交換を実施した。老朽化した配管のうち、坑内仮設備 では換気立坑の深度200m~300mに設置されている工事用配管(排水管,予備排水管,給水管, 給気管)を撤去した(図3.5-1)。坑外仮設備では地上部に設置している配管(排水処理設備から 河川への放流管,排水処理設備と沈砂池との間の送水管)を交換した。主立坑エレベーターのワ イヤロープの交換は、これまで使用してきたワイヤロープ(電纜入りロープ:長さ615m,径24mm) を巻き取り、新たに製作した同じ仕様のワイヤロープを巻き直した(図3.5-2)。



図3.5-1 配管の撤去(換気立坑深度200m~300m区間での作業状況)



図3.5-2 主立坑エレベーターのワイヤロープ交換(これまで使用してきたロープの巻き取り状況)

(2) 周辺環境モニタリング調査

1) 河川流量調査

2016年度は、2015年度に引き続き河川流量調査を行い、水位流量曲線式を作成した。調査には、 観測される水位(H)と流量(Q)の関係を示す水位流量曲線(H-Q曲線)を予め求めておき、 この関係を用いて計測した水位から流量を算定する方法を用いた。

調査は狭間川の4箇所に設置した河川流量計(水位計)により実施した。設置場所は狭間川の 上流,中流,下流および明世小学校前地点の4箇所であり,上流地点は研究所用地の北東約1,300m, 中流地点は東約50m,下流地点は南南東約800m,明世小学校前地点は南南東約850mである (図3.5-3)。

研究所用地内の2016年度の年間降水量(1,746mm)は過年度(2003年度~2015年度)の平均 値(1,656mm)を上回る値であった。降水量は,研究所用地内に設置した気象観測装置により観 測した(図3.3.2-1)。各河川流量調査地点の年間平均流量は,上流地点,中流地点は過年度の平 均値と同程度,下流地点,明世小学校前地点は過年度の平均値を上回る値であった(表3.5-1,年 間総流量:上流地点315,360m³,中流地点914,544m³,下流地点1,923,696m³,明世小学校前地点 2,838,240m³)。

2) 地下水位調査

研究所周辺の井戸10箇所に設置した地下水位計により調査を実施した。各地点において年間を 通じての地下水位の変動幅が把握されるとともに,井戸水の汲み上げの有無との関係,降雨時の 地下水位の反応の状況を把握した。調査の結果,各井戸の水位の傾向として,降水量によく呼応 した変動を示していた(図3.5-4)。

3) 騒音・振動調査

騒音・振動調査は、研究坑道掘削工事において稼動している機械や発破作業による影響を把握 するために実施している。2016年度は、4回実施した。調査結果は、騒音・振動とも特定建設業 の規制に関する基準⁶⁰⁾を下回るレベルであった。

4) 水質調査

研究坑道掘削工事に伴う立坑からの排水の放流先である狭間川の水質調査として,生活環境項 目および健康項目に関する水質分析を行った。調査場所は狭間川の上流および下流地点の2箇所 であり,上流地点は瑞浪国際地科学交流館敷地北側,下流地点は排水口から約20m下流である (図3.5-5)。水質分析結果は,分析項目すべてが環境基準値未満であった。



図3.5-3 河川流量測定位置図

年度	上流地点(流量m ³ /s)		中流地点(流量m ³ /s)			
	平均	最大	最小	平均	最大	最小
2003年度	0.018	0.313	0.007	0.039	0.759	0.009
2004年度	0.011	1.021	0.003	0.030	1.192	0.005
2005年度	0.007	0.109	0.002	0.013	0.410	0.001
2006年度	0.014	0.390	0.001	0.026	0.684	0.002
2007年度	0.007	0.306	0.001	0.024	1.159	0.006
2008年度	0.014	1.298	0.001	0.020	0.104	0.004
2009年度	0.007	0.346	0.001	0.019	0.494	0.001
2010年度	0.015	0.623	0.001	0.034	2.350	0.001
2011年度	0.013	0.246	0.001	0.045	1.027	0.002
2012年度	0.009	0.064	0.003	0.019	0.131	0.005
2013年度	0.010	0.118	0.003	0.029	0.398	0.006
2014年度	0.012	0.479	0.003	0.056	1.866	0.013
2015年度	0.010	0.148	0.003	0.032	0.227	0.003
2003~2015年度の 平均	0.011	0.420	0.002	0.030	0.831	0.004
2003~2015年度の 中央値	0.011	0.313	0.002	0.029	0.684	0.004
2016年度	0.010	0.964	0.003	0.029	2.390	0.001
左南						
在座	<u>٦</u>	└流地点(流量m³/s)	明世	小前地点(流量m ³	³ /s)
年度	下 平均	∽流地点(流量m ³ /s 最大) 最小	明世 平均	<u>t小前地点(流量m[°]</u> 最大	³ /s) 最小
年度 2003年度	下 平均 0.047	∽流地点(流量m ³ /s 最大 5.528) 最小 0.003	明世 平均 	±小前地点(流量m⊂ 最大 ─────	³ /s) 最小
年度 2003年度 2004年度	下 平均 0.047 0.062	流地点(流量m ³ /s 最大 5.528 9.427) 最小 0.003 0.003	明世 平均 一 一	<u>出小前地点(流量m)</u> <u>最大</u> — —	³ /s) 最小 一
年度 2003年度 2004年度 2005年度	下 平均 0.047 0.062 0.022	流地点(流量m ³ /s 最大 5.528 9.427 0.930) <u>最小</u> 0.003 0.003 0.003	明世 平均 — — —	<u>:小前地点(流量</u> m ² 最大 — — — —	³ /s) 最小 - -
年度 <u>2003年度</u> <u>2004年度</u> <u>2005年度</u> <u>2006年度</u>	平均 平均 0.047 0.062 0.022 0.067	流地点(流量m ³ /s 最大 5.528 9.427 0.930 1.489) 最小 0.003 0.003 0.003 0.003 0.007	明世 平均 — — — — —	:小前地点(流量m ² 最大 — — — — — —	³ /s) 最小 - - -
年度 <u>2003年度</u> <u>2004年度</u> <u>2005年度</u> <u>2006年度</u> <u>2007年度</u>	平均 平均 0.047 0.062 0.022 0.067 0.048	流地点(流量m ³ /s 最大 5.528 9.427 0.930 1.489 2.383) 最小 0.003 0.003 0.003 0.007 0.006	明世 平均 一 一 一 一 一	:小前地点(流量m ⁾ 最大 — — — — — — — — —	³ /s) 最小 - - - - -
年度 2003年度 2004年度 2005年度 2006年度 2007年度 2008年度	平均 平均 0.047 0.062 0.022 0.067 0.048 0.071	流地点(流量m ³ /s 最大 5.528 9.427 0.930 1.489 2.383 11.431) 最小 0.003 0.003 0.003 0.007 0.006 0.004	明世 平均 一 一 一 一 一 一	:小前地点(流量m ² <u>-</u> - - - - - - - - - - - - -	³ /s) 最小 - - - - - - - -
年度 2003年度 2004年度 2005年度 2006年度 2007年度 2008年度 2009年度	平均 平均 0.047 0.062 0.022 0.067 0.048 0.071 0.049	流地点(流量m ³ /s 最大 5.528 9.427 0.930 1.489 2.383 11.431 3.792) 最小 0.003 0.003 0.003 0.007 0.006 0.004 0.004	明世 平均 一 一 一 一 一 0.096	:小前地点(流量m ² 	*/s) 最小 - - - - - 0.018
年度 2003年度 2004年度 2005年度 2006年度 2007年度 2008年度 2009年度 2010年度	平均 平均 0.047 0.062 0.022 0.067 0.048 0.071 0.049 0.053	流地点(流量m ³ /s 最大 5.528 9.427 0.930 1.489 2.383 11.431 3.792 8.749) 最小 0.003 0.003 0.003 0.007 0.006 0.004 0.004 0.014 0.011	明世 平均 一 一 一 一 0.096 0.083	:小前地点(流量m ² 	*/s) 最小 0.018 0.008
年度 2003年度 2004年度 2005年度 2006年度 2007年度 2008年度 2009年度 2009年度 2010年度 2011年度	平均 0.047 0.062 0.022 0.067 0.048 0.071 0.049 0.053 0.054	流地点(流量m ³ /s 最大 5.528 9.427 0.930 1.489 2.383 11.431 3.792 8.749 1.757) 最小 0.003 0.003 0.003 0.007 0.006 0.004 0.014 0.011 0.008	明世 平均 一 一 一 一 0.096 0.083 0.088	:小前地点(流量m ² 1.030 8.809 2.009	*/s) 最小
年度 2003年度 2004年度 2005年度 2006年度 2007年度 2008年度 2009年度 2009年度 2010年度 2011年度 2012年度	平均 0.047 0.062 0.022 0.067 0.048 0.071 0.049 0.053 0.054 0.045	流地点(流量m ³ /s 最大 5.528 9.427 0.930 1.489 2.383 11.431 3.792 8.749 1.757 0.907) 最小 0.003 0.003 0.003 0.007 0.006 0.004 0.014 0.011 0.008 0.005	明世 平均 一 一 一 0.096 0.083 0.088 0.065	<u>小前地点(流量m)</u> 最大 - - - 1.030 8.809 2.009 0.819	*/s) 最小
年度 2003年度 2004年度 2005年度 2005年度 2007年度 2009年度 2009年度 2010年度 2011年度 2012年度 2013年度	平均 平均 0.047 0.062 0.022 0.067 0.048 0.071 0.049 0.053 0.054 0.045 0.062	流地点(流量m ³ /s 最大 5.528 9.427 0.930 1.489 2.383 11.431 3.792 8.749 1.757 0.907 2.169) 最小 0.003 0.003 0.003 0.007 0.006 0.004 0.014 0.011 0.008 0.005 0.007	明世 平均 一 一 一 0.096 0.083 0.088 0.065 0.079	<u>小前地点(流量m)</u> 最大 1.030 8.809 2.009 0.819 1.802	*/s) 最小
年度 2003年度 2004年度 2005年度 2006年度 2007年度 2009年度 2009年度 2010年度 2011年度 2012年度 2013年度 2014年度	平均 平均 0.047 0.062 0.022 0.067 0.048 0.071 0.049 0.053 0.054 0.045 0.062 0.089	流地点(流量m ³ /s 最大 5.528 9.427 0.930 1.489 2.383 11.431 3.792 8.749 1.757 0.907 2.169 19.023) 最小 0.003 0.003 0.003 0.007 0.006 0.004 0.014 0.011 0.008 0.005 0.007 0.003	明世 平均 0.096 0.083 0.088 0.065 0.079 0.097	小前地点(流量m 最大 一 一 一 一 1.030 8.809 2.009 0.819 1.802 7.422	*/s) 最小
年度 2003年度 2004年度 2005年度 2006年度 2007年度 2008年度 2009年度 2010年度 2011年度 2012年度 2013年度 2014年度 2015年度	平均 平均 0.047 0.062 0.022 0.067 0.048 0.071 0.049 0.053 0.054 0.045 0.062 0.089 0.059	流地点(流量m ³ /s 最大 5.528 9.427 0.930 1.489 2.383 11.431 3.792 8.749 1.757 0.907 2.169 19.023 2.581) 最小 0.003 0.003 0.003 0.007 0.006 0.004 0.014 0.011 0.008 0.005 0.005 0.007 0.003 0.007	明世 平均 	小前地点(流量m 最大 一 一 一 一 1.030 8.809 2.009 0.819 1.802 7.422 3.793	一 一 一 一 一 一 一 一 0.018 0.008 0.013 0.013 0.024 0.024
年度 2003年度 2004年度 2005年度 2006年度 2007年度 2008年度 2009年度 2010年度 2011年度 2012年度 2013年度 2013年度 2015年度 2003~2015年度の 平均	平均 平均 0.047 0.062 0.022 0.067 0.048 0.071 0.049 0.053 0.054 0.045 0.062 0.089 0.056	流地点(流量m ³ /s 最大 5.528 9.427 0.930 1.489 2.383 11.431 3.792 8.749 1.757 0.907 2.169 19.023 2.581 5.397) 最小 0.003 0.003 0.003 0.007 0.006 0.004 0.014 0.011 0.008 0.005 0.007 0.003 0.007 0.006	明世 平均 	小前地点(流量m 長大 一 一 一 一 1.030 8.809 2.009 0.819 1.802 7.422 3.793 3.669	最小 - - - - - - - 0.018 0.008 0.013 0.024 0.02 0.017
年度 2003年度 2004年度 2005年度 2006年度 2007年度 2008年度 2009年度 2010年度 2011年度 2011年度 2012年度 2013年度 2015年度 2003~2015年度の 平均 2003~2015年度の 中央値	平均 平均 0.047 0.062 0.022 0.067 0.048 0.071 0.049 0.053 0.054 0.062 0.062 0.059 0.056 0.054	流地点(流量m ³ /s 最大 5.528 9.427 0.930 1.489 2.383 11.431 3.792 8.749 1.757 0.907 2.169 19.023 2.581 5.397 2.581) 最小 0.003 0.003 0.003 0.007 0.006 0.004 0.014 0.011 0.008 0.005 0.007 0.003 0.007 0.006 0.006	明世 平均 	小前地点(流量m 最大 一 一 一 一 1.030 8.809 2.009 0.819 1.802 7.422 3.793 3.669 2.009	最小 - - - - - - - - 0.018 0.013 0.013 0.024 0.02 0.017 0.018

表3.5-1 河川流量測定地点における河川流量



図3.5-5 水質調査位置図

4. 共同研究・施設利用

瑞浪超深地層研究所における主な共同研究・施設利用として,2016年度は,以下の外部機関と の共同研究および研究坑道の施設利用を行った。

(1) 共同研究

① 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター:無線計測技術の適用性に関する研究

本研究は,結晶質岩を対象とした地質環境の変遷に関する観測技術として,地中無線モニタリ ング技術の適用性の確認を目的として実施する。

2016年度は、深度500m研究アクセス北坑道に設置した地中無線モニタリングシステムを用いて冠水坑道内の水位・水圧観測を実施した。

国立研究開発法人産業技術総合研究所:岩盤の水理・化学・生物連成現象に関わる研究

地下深部における長期的な物質移動挙動に関わる岩盤の水理特性,化学特性および化学特性に 関与する微生物・有機物特性の調査解析技術の高度化を目的として,結晶質岩を対象とした調査 研究を実施する。

2016年度は、深度200~500mの地下水を対象として微生物の採取・分析を継続した。

③ 一般財団法人電力中央研究所: 瑞浪超深地層研究所周辺の水理・物質移動特性評価および地下 水年代測定技術に関する研究

(a) 地下水年代調査・評価技術の開発

地下水の滞留時間を推定する方法を構築するために、研究所用地周辺のボーリング孔などから 地下水を採取し、主要化学成分、水素・酸素安定同位体、地下水中の放射性元素(³H, ¹⁴C, ³⁶Cl)、 希ガス濃度(⁴He)、地球温暖化ガス(CFCs(フロン)、SF₆(六フッ化硫黄))の調査を継続して いる⁶¹⁾。

2016年度は、研究坑道での地下水採水・分析を継続して実施した。その結果、相対的に新しい 地下水の指標として、水素・酸素同位体比、トリチウム、¹⁴Cが有効であり、相対的に古い地下水 の指標としては、Cl、⁴Heなどが指標になりうると推測された。また、地下水流動解析では、研 究坑道掘削に伴う水圧変化と水質の変化を、主立坑断層に透水異方性を考慮することなどの条件 を設定することで概ね再現することができた。

(b) 物質移動に関する調査・評価技術の開発

岩盤中の物質移動に関する特性を把握するための調査技術の構築を進めている。

2016年度は、深度500m研究アクセス南坑道において、トレーサー試験装置の原位置での適用 性を確認するために、単孔式のトレーサー試験および2本のボーリング孔間のトレーサー試験を 実施した(図3・1:15MI52号孔、15MI53号孔)。その結果、今回使用したトレーサー試験装置お よび試験手法を適用することにより、深度500mの岩盤においても物質移動評価のためのパラメ ータ(割れ目幅、坑道周辺の動水勾配、分散長など)を取得できることが概ね確認できた。さら に、深度500m研究アクセス南坑道において、1本の新規ボーリング調査を実施し(図3・1:16MI59 号孔)、透水性割れ目の分布や連続性などを評価するためのデータを取得した。

なお、本調査結果は、経済産業省資源エネルギー庁より電力中央研究所が受託し実施した「平 成28年度岩盤中物質移行特性評価技術高度化調査」の成果の一部である。

④ 韓国原子力研究所(KAERI):地質環境調査・地質環境モデルの構築に関する技術的支援

花崗岩中の地下水流動および水質形成メカニズムを把握するための原位置調査手法・モデル化 技術の高度化を目的として,原子力機構とKAERIの地下の研究施設計画や成果に関する技術検討 を行うとともに,両機関の研究者の交流を継続して実施してきている。

2016年度は、主に地質環境の長期変遷モデル化技術に関する既往事例について情報共有を行う とともに、KAERIが保有する地下研究施設(KURT)周辺を対象とした地質環境の長期変遷モデ ルを構築するために必要となる調査データについて、両機関で確認や検討を進めた。

⑤ スイス放射性廃棄物管理協同組合(Nagra): 超深地層研究所計画における調査計画の立案・ 実施に関する技術的支援

Nagraがこれまでに蓄積してきたサイト特性調査,地下研究施設(グリムゼル原位置試験場や モンテリ試験場など)での調査計画および管理運営に関する経験などに基づいて,超深地層研究 所計画で実施する地質環境調査に対する技術的な助言や,研究成果のレビューなどを実施してき た。

2016年度は、埋め戻し材の飽和-不飽和挙動の評価、土壌水分計測技術の適用性などについて 情報交換を行った。

⑥ 国立大学法人岡山大学:結晶質岩を対象とした微視的構造変化が長期挙動におよぼす影響に関 する研究

本研究は2016年度から共同研究として実施しているものであり,超長期を対象とした岩盤の長 期挙動メカニズムの把握に資するため,微視的亀裂の進展に着目した室内実験および化学反応も 考慮できるような数値解析による研究を通じ,一般性の高い岩盤の長期挙動メカニズムに関する 知見を得ることを目的とする。

2016年度は,弾性波の群速度による室内試験結果⁶²⁾について,物性評価に対する検討を進める ため,円柱状のコアを用いた詳細な弾性波速度測定を実施し,これまで計測してきた表面波と一 般的に用いられる透過波との関係性について比較・検討した。その結果,透過波測定で得られた 弾性波速度の異方性は,群速度としても同様に見られることを確認した。

⑦国立大学法人京都大学:土岐花崗岩の浸透率空間分布の詳細把握と地下水流動系との関連性に関する研究

本共同研究は,異なる複数のスケール(マルチスケール)における透水性の空間分布の詳細把 握およびその方法論の検討を目的として,研究坑道内(原位置)の調査やモデル化・解析を実施 するものである。

2016年度は、原位置での試験に先立ち、微小なスケールの透水性の検討として花崗岩中の空隙 分布に関する検討を実施するとともに、2017年度に実施を検討している原位置での数 cm~数 m スケールの透水性を検討する手法を検討した。

⑧ 国立大学法人京都大学・株式会社大林組:粘性流体注入に伴う周辺岩盤への影響に関する研究

本共同研究では、グラウトや二酸化炭素といった粘性流体が岩盤内に注入された際の亀裂など の不連続面の力学的挙動を解明することを目的として、原位置における注入試験を実施するもの である。

2016年度は、2015年度に実施した原位置注入試験時に取得したデータの詳細な分析評価を実施し研究成果の取りまとめを行った(成果については、3.3.1の2)に記載)。

⑨ 国立大学法人静岡大学:大深度地球化学モニタリング技術に関わる研究

地下深部における地球化学特性のモニタリング技術の高度化を目的として、チップ式化学電極 を利用した地下水の物理化学パラメータ測定技術の開発、地下研究所での原位置適用試験を実施 する。2016年度は、坑道埋め戻し時の電極配置方法について検討を行った。

11 国立大学法人東京大学:地下環境の形成に関わる微生物プロセスの評価技術の研究

地下深部における地球化学特性や物質移動に関わる微生物特性,微生物特性を反映する地下 水・鉱物の分析,解析技術の開発を行うとともに,それらを活用した原位置試験を実施する。

2016年度は、ボーリング孔を利用した原位置試験計画の検討を行うとともに、冠水坑道周辺の地下水中の有機物・コロイド粒子の観察を行った。

① 国立大学法人東京大学:結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価手法に関する研究

本研究は2016年度から共同研究として実施しているものであり、岩盤の長期挙動を把握・評価 できる技術の確立に資するため、年単位を超えるような岩石の長期クリープ試験や、高レベル放 射性廃棄物の地層処分において想定される常温から100℃程度の高温条件下での岩石の長期挙動 を把握するための技術の開発等を実施し、想定される様々な条件下での岩石の長期挙動現象の特 徴やその程度に関する実験的評価を行うことを目的としている。

2016年度は、主に水分の影響に関する室内試験と長期挙動を表現するための構成方程式(大久保モデル)⁶³⁾の改良を行い、水分量が岩石の変形挙動に及ぼす影響の度合いなどを把握するとと もに、改良した構成方程式は水分量の違いによらず変形挙動を統一的に説明できる可能性がある ことがわかった。

① 株式会社大林組: 亀裂性岩盤における透水不均質性のモデル化に関する研究

本研究は、亀裂性岩盤の水理物質移動現象を評価するためのモデル化手法の体系化に資することを目的として、亀裂ネットワークモデル(Discrete Fracture Network Model;以下,DFNモデル)の構築と、そのDFNモデルを用いた水理物質移動現象のシミュレーション解析、解析結果と実測データとの比較などのモデル化・解析手法に関する検討を実施する。

2016年度は、既往事例をレビューするとともに、DFNモデルの構築に用いる調査データとその 適用方法や解釈、モデル化方法についての検討・整理を実施した。また、瑞浪超深地層研究所で 取得された調査データに基づき、変質や充填鉱物種といった地質学的特徴を考慮したDFNモデル の構築や、DFNモデルの特徴の分析手法について検討を進めた。

① 鹿島建設株式会社:地中レーダによる坑道周辺岩盤における水理特性評価に関する研究

坑道周辺岩盤の水理特性(水の通り易さや水みちとなる割れ目の連結性,割れ目内の水分状態) を,水分に敏感な地中レーダを適用して非破壊で評価するための手法を開発するための研究を実施する。

2016年度は、深度500m研究アクセス南坑道において地中レーダによる計測を行い、坑道近傍の水みちとなる割れ目のモニタリング技術としての本手法の適用性評価を行った。

④ 清水建設株式会社:逆解析を用いた地下水流動のモデル化・解析に関する研究

本研究は、限られた調査データを有効に活用して不均質な水理特性の空間分布を効率的に評価 できるように、逆解析を組み込んだ地下水流動特性の評価手法に関する検討を行う。具体的には、 複数の逆解析手法を用いた数値実験を実施し、解析手法の違いが解析結果に及ぼす影響について の分析と逆解析を実施する上での重要因子の抽出を行い,解析手法の高度化を図る。また,原位 置調査データを用いた逆解析手法の適用性を確認しつつ,地下深部かつ広範囲の空間スケールを 評価対象とした逆解析ツールを整備する。最終的には,逆解析を組み込んだ地下水流動特性の評 価手法の方法論を示す。

2016年度は、瑞浪超深地層研究所で取得した揚水試験に伴う水圧変化データを用いた検討を実施し、逆解析を用いた水理地質構造の透水不均質性の評価手法の具体例を提示した。その結果、既往の知見と整合的な断層や周辺岩盤の透水不均質性が推定でき、地下水流動特性評価における水圧変化データを用いた逆解析の有効性を示した。

① 清水建設株式会社、デンカ株式会社、国立大学法人岡山大学、学校法人日本大学:低アルカリ 性瞬結吹付けコンクリートと岩盤の相互作用に関する研究

本研究は、2013 年度に深度 500m 研究アクセス南坑道において現場施工試験が行われた低ア ルカリ性瞬結吹付けコンクリートを対象として、周辺環境への影響予測技術の確立を目標として いる。

2016年度は、研究初年度として、研究全体計画の策定とともに、瑞浪超深地層研究所内の現場施工箇所周辺の地質環境情報の整理,室内試験装置の整備、同試験に使用予定の土岐花崗岩やコンクリートおよび深度 500m 研究坑道内で採取した地下水の初期値分析を実施した。

① 株式会社東京測器研究所:光ファイバひび割れ検知センサーの安全確保技術としての適用性に 関する研究

本研究は、深度300mステージで、温度・湿度環境が異なる3箇所(計測点1;ボーリング横坑 (換気立坑),計測点2;避難所,計測点3;研究アクセス坑道11m計測坑道)に光ファイバひび 割れ検知センサーを設置し、センサーの長期耐久性および坑道壁面とセンサーを接着させるため に用いた接着剤(ポリエステル系接着剤;PS,エポキシ系接着剤;EB-2,いずれも東京測器研 究所製)の長期耐久性を確認する試験を実施する。

2016年度は、2015年度の点検において、計測点1(接着剤; PS, EB-2)、計測点2(接着剤; PS)、計測点3(接着剤; PS)のひび割れ検知センサーに剥離が確認されたため、2016年4月26 日をもって同箇所の測定を終了し、残りの測定点2(接着剤; EB-2)および測定点3(接着剤; EB-2)のセンサーおよび接着剤の長期耐久性試験を継続し、4月、8月、10月、1月に点検を実施 した。

センサーの健全性の検証においては、目視による外観検査と光ファイバ導通チェッカを用いた センサーの異常の有無を確認した。接着剤の健全性の検証においては、目視による外観検査を実 施するとともに、センサー付着健全度確認用ひずみゲージを用いて、検査治具による加圧前後の ひずみを測定し、接着剤の接続状況を確認した。その結果、ひび割れセンサーが正常であること、 また、接着剤による接着状況が健全であることを確認した。

(2) 施設利用

① 公益財団法人地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所

地震予知総合研究振興会東濃地震科学研究所(以下,東濃地震科学研究所)とは,研究協力会 議に関する確認書に基づき,研究協力会議を設置し,情報交換などを行っている。地震発生機構 の解明や地域防災に関する研究を進めている東濃地震科学研究所と,超深地層研究所計画などの 地層科学研究を行っている東濃地科学センターが緊密な相互協力を進めることにより,両機関の 研究開発や地域の地震防災対策への寄与が期待できる。 2016年度は、2015年度に引き続き、東濃地震科学研究所が計画している、立坑掘削に伴う地球 物理学的変動観測研究および地震動観測のため、研究坑道を利用した東濃地震科学研究所の調査 研究に協力した。具体的には、東濃地震科学研究所は、これまでに深度100mから深度400mの研 究坑道内に設置した傾斜計、地震計、応力計、重力計による連続観測を実施した。

② 国立大学法人名古屋大学

名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構(以下,名古屋大学)は、スイスの欧州原子核研究所で人 工的に作ったニュートリノビームを730km離れたイタリアの研究所へ照射し、ニュートリノが質 量を持つことを証明するための国際共同実験(OPERA実験)に参加している。この実験におい ては、放射線の飛跡を検出するために原子核乾板が使用されている。原子核乾板の保管は、宇宙 線の蓄積を抑えることが重要であることから、名古屋大学より、低宇宙線環境である研究所の研 究坑道内を原子核乾板の保管場所として使用したいとの依頼があり、2011年度より深度200mボ ーリング横坑(主立坑)の一部を貸与することとした。

2016年度は、深度200mボーリング横坑(主立坑)における原子核乾板の保管に協力した。

③ 学校法人早稲田大学

早稲田大学理工学術院総合研究所では、名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構・現象解析研セン ターと協働し、わが国の研究者がノーベル物理学賞を受賞している素粒子関連の研究を進めてお り、理論的にその存在が予測されているダークマター(暗黒物質)の実験的検証に取り組んでい る。この研究に関する地下空間利用への予察的な知見を得ることを目的として、2015年度に研究 所用地の地上および深度100m研究坑道内で短期間の環境中性子観測を実施した。原子力機構で は、研究所の地上部および深度100m予備ステージへの観測装置類の搬出入や観測作業などに協 力した。

2016年度は、早稲田大学から研究所の研究坑道内などでの環境中性子観測の実施要請があった場合は、これらの観測に協力する予定であったが、実施の要請はなかった。

5. おわりに

超深地層研究所計画は,結晶質岩を対象とした深地層の科学的研究の一環として1996年度から 実施しているものである。2016年度は第3段階「研究坑道を利用した研究段階」の調査研究を実 施した。

主な調査研究として,深度500m研究アクセス北坑道において,再冠水試験を継続し,冠水坑 道とその周辺のボーリング孔に設置した観測装置を用いて,地下水の水圧や水質の変化および岩 盤変位の観測を行った。また,深度300mボーリング横坑(換気立坑)において原位置でのトレ ーサー試験を実施するとともに,深度500m研究アクセス南坑道において坑道周辺の割れ目分布 などの地質・地質構造,透水性などの水理学的特性を把握するためのボーリング調査を実施した。 加えて,従来から実施している地上や研究坑道から掘削したボーリング孔に設置した観測装置を 用いた地下水の水圧・水質の長期観測を継続した。さらに,深度500m研究アクセス南坑道にお いて,プレグラウト実施区間のうち比較的湧水が多い区間を対象にポストグラウトを実施し,そ の湧水抑制効果について評価を行った。

これらの成果は,原子力発電環境整備機構が行う概要調査段階から精密調査段階において必要 となる調査技術の整備や,国が実施する安全規制における安全審査の指針・ガイドラインの策定 に活用できるものと考える。

参考文献

- 1) 原子力委員会:原子力政策大綱,2005.
- 2) 原子力委員会:原子力の研究,開発および利用に関する長期計画,1994.
- 3) 動力炉・核燃料開発事業団:超深地層研究所地層科学研究基本計画, PNC TN7070 96-002, 1996, 20p.
- 4) 原子力委員会:原子力の研究,開発および利用に関する長期計画,2000.
- 5) 核燃料サイクル開発機構:超深地層研究所地層科学研究基本計画, JNC TN7410 2001-009, 2001, 100p.
- 6) 核燃料サイクル開発機構:超深地層研究所地層科学研究基本計画, JNC TN7410 2001-018, 2002, 103p.
- 7) 資源エネルギー庁,日本原子力研究開発機構:高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開 発に関する全体計画,2006.
- 8) 日本原子力研究開発機構:超深地層研究所地層科学研究基本計画, JAEA-Review 2010-016, 2010, 37p.
- 9) 日本原子力研究開発機構改革本部:日本原子力研究開発機構の改革の基本的方向-安全を最優先とした組織への変革を目指して-,平成25年8月8日, http://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afieldfile/2013/08/14/ 1338627 3 1.pdf(参照: 2017年9月5日).
- 10) 日本原子力研究開発機構:日本原子力研究開発機構の改革計画 自己改革 「新生」へのみ ち-,平成25年9月26日, http://www.jaea.go.jp/02/press2013/p13092601/01.pdf(参照:2017年9月5日).
- 11) 日本原子力研究開発機構:日本原子力研究開発機構の改革計画に基づく「地層処分技術に関 する研究開発」報告書-今後の研究課題について-,平成26年9月30日.
- 12) 日本原子力研究開発機構:超深地層研究所 地層科学研究基本計画, JAEA-Review 2015-015, 2015, 39p.
- 13) 濱 克宏,竹内竜史,三枝博光,岩月輝希,笹尾英嗣,見掛信一郎,池田幸喜,佐藤稔紀, 大澤英昭,小出 馨:超深地層研究所計画 年度計画書(2015年度),JAEA-Review 2015-021, 2015, 27p.
- 14) 動力炉・核燃料開発事業団:広域地下水流動研究基本計画書, PNC TN7020 98-001, 1997, 12p.
- 15) 核燃料サイクル開発機構:高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築-平成17年取りまとめー分冊1深地層の科学的研究-",JNC TN1400 2005-014, 2005, 415p.
- 16) 三枝博光, 瀬野康弘, 中間茂雄, 鶴田忠彦, 岩月輝希, 天野健治, 竹内竜史, 松岡稔幸, 尾上博則, 水野 崇, 大山卓也, 濱 克宏, 佐藤稔紀, 久慈雅栄, 黒田英高, 仙波 毅, 内田雅大, 杉原弘造, 坂巻昌工: 超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階 (第1段階)研究成果報告書, JAEA-Research 2007-043, 2007, 337p.
- 17) 三枝博光,松井裕哉,濱 克宏,佐藤稔紀,鶴田忠彦,竹内竜史,國丸貴紀,松岡稔幸, 水野 崇:超深地層研究所計画における調査研究の考え方と進め方,JAEA-Review 2011-022, 2011,78p.
- 18) 糸魚川淳二:瑞浪地域の地質,瑞浪市化石博物館専報, no1, 1980, pp.1-50.
- 19) 陶土団体研究グループ:断層境界を伴う多数の基盤ブロックからなる内陸盆地-岐阜県多治 見市周辺の東海層群堆積盆地の例-,地球科学, vol.53, no.4, 1999, pp.291-306.
- 20) 糸魚川淳二:瑞浪層群の地質,瑞浪市化石博物館研究報告, no1, 1974, pp.9-42.
- 21) 氏原 温, 入月俊明, 細山光也:岐阜県東濃地域の新第三系, 日本地質学会第106年学術大会見

学旅行案内書, 1999, pp.97-116.

- 22) 日本の地質「中部地方Ⅱ」編集委員会:日本の地質5,中部地方Ⅱ,共立出版,1988,310p.
- 23) Tsuji, M., Kobayashi, S., Sato, T. and Mikake, S. : Grouting for reducing groundwater inflow into a gallery at 500m depth of the Mizunami Underground Research Laboratory, Japan, Proceedings of the ISRM Regional Symposium EUROCK 2015 & 64th Geomechanics Colloquium, Future Development of Rock Mechanics, 2015, pp.35-41.
- 24) 経済産業省資源エネルギー庁:平成28年度地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証 技術開発 報告書,平成29年3月,pp.2-217-2-227.
- 25) 谷 智弘, 内田善久: セメントミルクの濃度と注人特性の関係について, ダム工学, 9, 1999, pp.175-186.
- 26) 蔵重 勲, 廣永道彦: 地下水梅雨炭酸水素イオンによるセメント系材料の用脱抑制メカニズム に関する検討(その1), 電力中央研究所報告, 2007, N06028.
- 27) 日本原子力研究開発機構:平成24年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処 分関連 地下坑道施工技術高度化開発 6ヵ月報告書,平成25年3月.
- 28) 山本武志, 廣永道彦:セメント系人工バリア材料の溶脱変質特性の実験的検討, 電力中央研 究所報告, 2006, N05019.
- 29) 見掛信一郎,山本 勝,池田幸喜,杉原弘造,竹内真司,早野 明,佐藤稔紀,武田信一, 石井洋司,石田英明,浅井秀明,原 雅人,久慈雅栄,南出賢司,黒田英高,松井裕哉, 鶴田忠彦,竹内竜史,三枝博光,松岡稔幸,水野 崇,大山卓也:結晶質岩を対象とした坑道掘 削における湧水抑制対策の計画策定と施工結果に関する考察,JAEA-Technology 2010-026, 2010, 146p.
- 30) 宮西賢一, 森本一生, 高田史朗: 天然鉱物資源を利用した超深層地下水中のフッ素除去技術の実例, 第13回 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会.
- 31) 日本原子力研究開発機構東濃地科学センター,「瑞浪超深地層研究所に係る環境保全協定書」 に基づく排出水等の測定結果,

https://www.jaea.go.jp/04/tono/an_miuwater/an_miuwater_1.html (参照: 2017年9月5日).

- 32) 島田允堯:自然由来重金属等による地下水・土壌汚染問題の本質:フッ素,応用地質技術年 報, no.30, 2011, pp3-29.
- 33) 環境省: 排水処理技術の事例, ほう素及びその化合物, ふっ素及びその化合物, http://www.env.go.jp/water/effluent_case/pdf/boron-fluorine.pdf(参照: 2017年6月6日).
- 34) 環境省:温泉排水規制に関する検討会(第11回),資料4 温泉排水処理技術の調査結果, http://www.env.go.jp/water/onsen-haisui/conf/11/mat04.pdf(参照:2017年6月6日).
- 35) 和田祐司:フッ素含有排水の高度処理法,科学と工業,vol.76, no.11, 2002, pp.557-564.
- 36) 廣木功実, 三上八州家, 渡辺大晃: ハロゲンキラーによる排水中の F、B の除去, 表面技術, vol.55 no.8, 2004, pp.526-528.
- 37) 二瓶智也,林 浩志,山崎淳司,所 千晴: MgO を中和剤とする層状複水酸化物の生成反応と フッ素排水処理法への応用,資源と素材, vol.129, no.4, 2013, pp132-137.
- 38) 島田允堯:自然由来重金属等による地下水・土壌汚染問題の本質:ホウ素,応用地質技術年 報, no.32, 2013, pp.29-55.
- 39) 和田祐司: 排水中ホウ素・フッ素の法規制・除去・処理技術, 化学装置, vol.52, no.8, 2010, pp.68-79.
- 40) 飯塚 淳:水中からのホウ素、フッ素除去, 資源・素材2013-秋季大会-, 2013.
- 41) 環境省:[環境技術実証モデル事業]平成17年度実証試験結果報告書の概要 非金属元素排水

処理技術分野(ほう素等排水処理技術),

https://www.env.go.jp/policy/etv/pdf/list/h17/02_hp.pdf(参照:2017年9月5日).

42) 環境省:[環境技術実証モデル事業]平成18年度実証試験結果報告書の概要 非金属元素排水 処理技術分野(ほう素等排水処理技術),

http://www.env.go.jp/policy/etv/pdf/list/h18/02_hp.pdf(参照:2017年6月6日).

- 43) 公害防止の技術と法規編集委員会編:新・公害防止の技術と法規2006水質編, 2006, p.947.
- 44) 弥富洋介,保科宏行,瀬古典明,島田顕臣,尾方伸久,杉原弘造,笠井 昇,植木悠二, 玉田正男:放射線グラフト捕集材を用いた湧水中フッ素・ホウ素除去効率化の検討,日本原 子力学会和文論文誌, vol.9, no.3, 2010, pp330-338.
- 45) 岩崎理代, 濱 克宏, 森川圭太, 細谷真一:物質移動に係るパラメータ値の取得, JAEA-Technology 2016-037, 2016, 62p.
- 46) 石橋正祐紀, 笹尾英嗣, 濱 克宏: 深部結晶質岩マトリクス部における微小移行経路と元素拡 散現象の特徴, 原子力バックエンド研究, vol.23, 2016, pp.121-130.
- 47) 西尾和久, 弥富洋介:「平成28年度 東濃地科学センター 地層科学研究 情報・意見交換会」 資料集, JAEA-Review 2016-031, 2016, pp.11-17.
- 48) Ohyama, T., Saegusa, H. : GEOMASS System, JAEA-Testing 2008-007, 2009, 248p.
- 49) Ishibashi, M., Yoshida, H., Sasao, E., Yuguchi, T. : Long term behavior of hydrogeological structures associated with faulting: An example from the deep crystalline rock in the Mizunami URL, Central Japan, Engineering Geology, vol.208, 2016, pp. 114-127.
- 50) 石橋正祐紀, 安藤友美, 笹尾英嗣, 湯口貴史, 西本昌司, 吉田英一: 深部結晶質岩における割 れ目の形成・充填過程と透水性割れ目の地質学的特徴-土岐花崗岩を例として-, 応用地質, vol.55, 2014, pp.156-165.
- 51) Sasao, E., Yuguchi, T., Itho, T., Inoue, T., Ishibashi, M. : Formative mechanism of inhomogeneous distribution of fractures, an example of the Toki Granite, Central Japan, Proceedings of 10th Asian Regional Conference of International Association for Engineering Geology and the Environment, 2015, 6p.
- 52) Nishimoto, S., Yoshida, H., Asahara, Y., Tsuruta, T., Ishibashi, M., Katsuta, N., : Episyenite formation in the Toki granite, central Japan, Contributions to Mineralogy and Petrology, vol.167, no.1, 2014, p.960.
- 53) 高木秀雄, 三輪成徳, 横溝佳侑, 西嶋 圭, 円城寺守, 水野 崇, 天野健治: 土岐花崗岩中の石 英に発達するマイクロクラックの三次元方位分布による古応力場の復元と生成環境, 地質学 雑誌, 第114巻, 第7号, 2008, pp.321-335.
- 54) W.S.ピッチャー:花崗岩の成り立ち-その性質と成因-第2版, p.390.
- 55) 窪島光志, 石橋正祐紀, 笹尾英嗣, 鶴田忠彦, 田上雅彦, 湯口貴史: 超深地層研究所計画 地 質・地質構造に関する調査研究-深度 300m までの地質・地質構造-, JAEA-Research 2012-037, 2013, 76p.
- 56) Tsuchiya, N., Yamada, R., Uno, M. : Supercritical geothermal reservoir revealed by a granite-porphyry system, Geothermics, vol.63, 2016, pp.182-194.
- 57) Fournier, R.O., Hydrothermal Processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment, Economic Geology, vol.94, 1999, pp.1193-1211.
- 58) Hama, K. and Metcalfe, R. : Groundwater dating applied for geological disposal of radioactive waste -A review of methods employed worldwide-, J. Jap. Assoc. Hydrol.

Sci., vol.44, no.1, 2014, pp.39-64.

- 59) 藤戸 航,山下寛人, Ziad Bennour, 直井 誠,石田 毅,藤井宏和,鈴木健一郎,松井裕哉: 瑞浪地点原位置岩盤における水圧破砕実験およびAEによる震源メカニズム推定,平成29年 度石油技術協会 特別講演会・春季講演会(シンポジウム・個人講演)要旨集, p.141, 2017.
- 60) 環境省令第一一号, 振動規制法施行規則, 第11条「特定建設作業の規制に関する基準」, 2007.
- 61) 萩原大樹,岩月輝希,長谷川琢磨,中田弘太郎,富岡裕一:浅層地下水の地下深部への侵入 -³H, CFCs, SF₆トレーサーを用いた評価-,日本水文科学会誌,第45巻,第2号,2015,pp.21-38.
- 62) 松井裕哉,尾崎裕介,木本和志,市川康明:表面波計測による結晶質岩の物性評価に向けた 基礎的検討,第66回材料学会年次学術講演会講演予稿集,2017,講演番号103 in USB.
- 63) Okubo, S., Nishimatsu,Y., Fukui, K. : Complete creep curves under uniaxial compression, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, vol.28, 1991, pp.77-82.

付録 広域地下水流動研究2016年度報告

1. はじめに

東濃地科学センターでは,広域地下水流動研究の一環として,

① 土岐花崗岩における水理学的・地球化学的な基礎情報の取得

② 地下水流動解析結果の妥当性確認のためのデータの取得

の二つを目的として,研究領域内に掘削された最大深度約1,000mの複数のボーリング孔において,多区間で観測できるモニタリング装置を設置し,地下水長期モニタリングを実施している。

2016年度は、年度計画¹に基づく地下水モニタリングを実施した。観測地点および2016年4月から2017年3月までの地下水モニタリング結果を図1~7に示す。

2. 地下水圧の観測地点

2016年現在, DH-2, DH-7, DH-9, DH-11, DH-13号孔においてMPシステムを, DH-15号孔 においてSPMPシステム(Solexperts社製)を用いて地下水モニタリングを実施している。図1 にボーリング孔の位置を示す。ボーリング孔における観測区間の地質は, DH-15号孔のNo.1のみ 瑞浪層群で, その他についてはいずれも土岐花崗岩である。



図1 ボーリング孔位置図(2015年度)

3. 地下水モニタリング結果

地下水モニタリング結果を図2~図7にまとめる。なお、図中では地下水圧を換算して全水頭の 変化として示し、全水頭は標高で表記した。

(1)研究所用地近傍(DH-2,15号孔)の地下水圧変化(図2,図3)

DH-2号孔では、地下水の水圧および水質の観測を実施した。地下水圧については、2016年4月 16日の熊本地震によると考えられる全水頭の増加がみられた後、長期的には全水頭の低下傾向が 認められる。また、一時的な地下水圧の変動も認められる。これは、深度300mボーリング横坑、 深度500m研究アクセス南坑道で実施された調査に関連すると考えられる。一方で、冠水坑道で の水圧変化に連動する地下水圧の変化は確認されていない。また、地下水の水質分析を行い深度 プロファイルを把握した。

DH-15号孔では、地下水圧の観測を実施した。地下水圧の挙動を確認するとすべての区間で全 水頭の低下傾向が認められるものの、深度300mボーリング横坑、深度500m研究アクセス南坑道 で実施された調査や冠水坑道内の地下水の水圧変化の影響と考えられる水圧の変化は確認されて いない。また、DH-2号孔で確認された2016年4月16日の熊本地震による全水頭の変化も確認でき なかった。

(2) DH-7,9,11,13号孔の地下水圧変化(図4~図7)

DH-7号孔とDH-13号孔ではデータロガーの不具合により,DH-9号孔では水圧観測装置の不具合により,水圧観測を中断していたものを2017年3月より再開した。

DH-7号孔およびDH-13号孔では、再開後しばらく水圧の安定に時間を要したものの、安定後の全水頭は観測中断時とほぼ同程度の全水頭であることを確認している。

DH-9号孔では2016年4月16日の熊本地震に伴うと考えられる全水頭の低下が生じていたが、観 測を再開した2017年3月には、ほとんどの区間で地震発生前の全水頭まで回復し、長期的には全 水頭はほぼ横ばいで大きな変化は生じていないものと推定される。

DH-11号孔の観測結果では、全水頭はほぼ横ばいの傾向を示し、2016年度に実施された研究坑 道内の作業に関連した全水頭の変化はみられなかった。



図2 地下水長期モニタリングの観測結果の例(DH-2号孔)

- 66 -


地下水長期モニタリングの観測結果の例(DH-15号孔)

ო

X



DH-7号孔

図4 地下水長期モニタリングの観測結果の例(DH-7号孔)



DH-9号孔

地下水長期モニタリングの観測結果の例(DH-9号孔) 义 2

- 69 -

JAEA-Review 2017-026



地下水長期モニタリングの観測結果の例(DH-11 号孔)

ശ

X

JAEA-Review 2017-026



地下水長期モニタリングの観測結果の例(DH-13 号孔)

参考文献

1) 濱 克宏, 竹内竜史, 岩月輝希, 笹尾英嗣, 見掛信一郎, 池田幸喜, 松井裕哉, 大澤英昭:超深地層研究所計画 年度計画書(2016年度), JAEA-Review 2016-015, 2016, 29p.

_

表 1. SI 基本単位				
甘大昌	SI 基本単位			
本平里	名称	記号		
長さ	メートル	m		
質 量	キログラム	kg		
時 間	秒	s		
電 流	アンペア	Α		
熱力学温度	ケルビン	Κ		
物質量	モル	mol		
光度	カンデラ	cd		

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単	位の例			
AI 立 是 SI 組 立 単位	SI 組立単位			
名称	記号			
面 積 平方メートル	m ²			
体 積 立方メートル	m ³			
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s			
加 速 度メートル毎秒毎秒	m/s^2			
波 数 毎メートル	m ⁻¹			
密度,質量密度キログラム毎立方メートル	kg/m ³			
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m ²			
比体積 立方メートル毎キログラム	m ³ /kg			
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	A/m ²			
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m			
量 濃 度 ^(a) , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m ⁸			
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m ³			
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m ²			
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1			
比 透 磁 率 (b) (数字の) 1	1			
(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度				

(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 租立单位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体鱼	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 (b)	m^2/m^2
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	-	s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m ²	$m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕 事 率 , 工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電 荷 , 電 気 量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{2} A^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量,比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^2$
線量当量,周辺線量当量, 方向性線量当量,個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(1) ダール kat [s¹ mol]
 (w)SH接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (h)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (a)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周期現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。 セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM物告2(CI-2002)を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	[組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^{2} s^{2} K^{1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^2$
熱伝導率	「ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘 電 卒	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語						
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号	
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с	
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m	
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ	
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n	
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р	
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f	
10^3	+ 1	k	10^{-18}	アト	а	
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z	
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v	

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位					
名称	記号	SI 単位による値			
分	min	1 min=60 s			
時	h	1 h =60 min=3600 s			
日	d	1 d=24 h=86 400 s			
度	۰	1°=(π/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad			
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²			
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³			
トン	t	$1 t=10^3 kg$			

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表され						
名称	記号	SI 単位で表される数値				
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J				
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ^{·27} kg				
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da				
天 文 単 位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m				

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位しの粉結的な朋友け
ベル	В	対数量の定義に依存。
デシベル	dB -	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値		
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J		
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N		
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s		
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$		
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx		
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²		
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$		
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T		
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹		
(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ▲ 」				

は対応関係を示すものである。

			表	10.	SIに 尾	属さないその他の単位の例
	-	名利	5		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	"		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートル	采	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
+1	ы		11	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$